AUS DEM PHYSIOLOGISCHEN INSTITUT, LEHRSTUHL II
DER UNIVERSITÄT DÜSSELDORF
DIREKTOR: PROFESSOR DR. J. HAASE

PSYCHOPHYSISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR CHARAKTERISIERUNG DER DEUTERANOMALIE DURCH DIE BEIDEN LANGWELLIGEN ZAPFENPIGMENTE

INAUGURAL - DISSERTATION
zur
Erlangung des Doktorgrades
der
Medizinischen Fakultät
der
Universität Düsseldorf

vorgelegt von
Heiner Stöcker

Düsseldorf 1980

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41543910_0011

AUS DEM PHYSIOLOGISCHEN INSTITUT, LEHRSTUHL II
DER UNIVERSITÄT DÜSSELDORF
DIREKTOR: PROFESSOR DR. J. HAASE

PSYCHOPHYSISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR CHARAKTERISIERUNG DER DEUTERANOMALIE DURCH DIE BEIDEN LANGWELLIGEN ZAPFENPIGMENTE

I N A U G U R A L - D I S S E R T A T I O N
ZUR
ERLANGUNG DES DOKTORGRADES
DER
MEDIZINISCHEN FAKULTÄT
DER
UNIVERSITÄT DÜSSELDORF

VORGELEGT VON
HEINER STÖCKER

DÜSSELDORF 1980

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität Düsseldorf

Der Dekan	Referent:
der Medizinischen Fakultät	Prof. Dr. H. Scheibner
der Universität Düsseldorf	Korreferent:
gez.:	Prof. Dr. W. Hammerstein
Prof. Dr. H. L. Krüskemper	

Tag der mündlichen Prüfung: 2.7.1980

Druck: V+V SOFORTDRUCK Scheurenstraße 57, 4000 Düsseldorf, Telefon 0211/374885

Meinen Eltern gewidmet

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
A. Einleitung	1
B. Allgemeine Grundlagen	2
1. Farbenfehlsichtigkeit	2
2. Farbenraum, Farbvalenz und Farbsystem	3
3. Prinzip der Fehlfarbenbestimmung	6
4. Reduktion der Deuteranomalie auf die Deuteranopie	8
5. Prinzip der Alychnenbestimmung	11
6. Reduktion der anomalen Trichromasie auf ein eindimensionales reines Helligkeitssehen	14
7. Schnittspur der Alychne mit der Farbtafel	15
8. Prinzip der Spektralwertkurvenbestimmung	16
9. Wechsel des Bezugssystems	18
10. Testverfahren zum interindividuellen Vergleich von anomalen Trichromaten nach von Kries, modifiziert von Alpern et al.	19
11. Charakterisierung der Deuteranomalie	21
a. Genetischer Aspekt	21
b. Anomalquotient	22
c. Fusions- und Ausfallhypothese	24
d. Cluster-Hypothese	24
C. Aufgabenstellung	26

Seite

D. Versuchsdurchführung 28

1. Versuchspersonen 28
2. Apparatur 29
3. Fehlfarbenbestimmung 33
4. Bestimmung der Alychne 37
5. Bestimmung der Spektralwertkurven 38
6. Bestimmung der Transformationsgleichungen 39

E. Ergebnisse 42

1. Darstellung der Fehlfarben 42
2. Darstellung im CIE-System von 1931 50
3. Alychne, Alychnenspur und Leuchtdichte-beiwerte 50
4. Spektralwertkurven 51
5. Abbildung auf einen deuteranopischen Farbenraum (K, W) 61
6. Hellempfindlichkeitsfunktionen 62
7. Interindividueller Vergleich der beiden deuteranomalen Brüder H.S. und K.S. 70

F. Diskussion 73

1. Fehlfarbe 73
2. Die Lage des Fehlpunktes 76
3. Prüfung auf Homogenität der Fehlfarben 78
4. Wie ist die Lage des Fehlpunktes zu interpretieren? Ein Vergleich mit anderen Autoren 78

Seite

5. Deuteranomalie und die Dichromasie 82
6. Der anomale trichromatische Farbenraum 84
7. Spektralwertkurven 86
8. Alychne, Alychnenspur und Leuchtdichtebeiwerte 90
9. Hellempfindlichkeitskurven 91
10. Fusion oder Ausfall? 94
11. Worin besteht die Alteration der Deuteranomalie gegenüber der normalen Trichromasie? 96
12. Einfache und extreme deuteranomale Trichromaten 99
13. Cluster-Hypothese 101

G. Zusammenfassung 104

H. Schrifttum 106

A. Einleitung

"Now, as it is almost impossible to conceive each sensitive point of the retina to contain an infinite number of particles, each capable of vibrating in perfect unison with every possible undulation, it becomes necessary to suppose the number limited: for instance to the three principal colours red, yellow and blue ... "

Diesen Satz schrieb im Jahre 1802 Thomas Young in seinem Werk "On the theory of light and colours" (118, p. 20ff.).

Er begründete damit die Drei-Komponenten-Theorie des Farbensehens.

Helmholtz (27) erweiterte die Theorie und sprach von drei unabhängigen Fundamentalmechanismen, einer empfindlich im langwelligen (rot), einer im mittelwelligen (grün), und einer im kurzwelligen Bereich (violett).

Die Eigenart des Farbensehens wurde dadurch zum erstenmal auf das Vorhandensein von drei verschiedenen farbempfindlichen Mechanismen zurückgeführt.

Das sichtbare Licht, das im Wellenlängenbereich von 380 nm bis etwa 750 nm liegt, wird vom Auge in der Retina über drei Farbkanäle verarbeitet.

Wie die aufgenommene physikalische Strahlung gewandelt wird, und wie diese drei Mechanismen arbeiten, das konnte Thomas Young nur vermuten.

Maxwell (49, 50) stellte zum erstenmal "color matching functions" auf. Lord Rayleigh (66) beschrieb die anomalen Trichromaten. Den Gesetzen von Graßmann (23) folgend, bestimm-

ten König und Dieterici (41) ihre "Elementarempfindungskurven". Abney (1) legte seine "sensation curves" vor, und schließlich bildeten die Untersuchungen von Guild (24) und Wright (114) die Grundlage für die Aufstellung des CIE-Normalbeobachters von 1931.

B. Allgemeine Grundlagen

B.1. Farbenfehlsichtigkeit

Rushton (74) nannte die drei verschieden absorbierenden Zapfenpigmente eines normalen Trichromaten "Cyanolab" für das kurzwellige Pigment, "Chlorolab" für das mittelwellige Pigment und "Erythrolab" für das langwellige Pigment.

Etwa 8% der männlichen Bevölkerung besitzen eine Farbenfehlsichtigkeit (40), die X-chromosomal rezessiv vererbt wird. Wir können dabei zwischen Dichromaten und anomalen Trichromaten unterscheiden. Daneben gibt es noch sog. Monochromaten.

Die Monochromasie ist charakterisiert durch das Fehlen jeglicher Farbempfindung (= Buntempfindung). Die Gruppe der Dichromaten läßt sich unterteilen in Tritanope, Deuteranope und Protanope, die dadurch gekennzeichnet sind, daß das dreidimensionale Farbensehen auf ein zweidimensionales Farbensehen durch den Verlust eines Pigments reduziert ist. Im Falle der Tritanopie fehlt das kurzwellige Pigment Cyanolab; für die Deuteranopie gilt, daß das mittelwellige Pigment Chlorolab fehlt und für die Protanopie gilt folglich der Verlust des langwelligen Pigmentes Erythrolab.

Die anomalen Trichromaten (53) sind nach allgemeiner Auffassung keine reduzierte, sondern eine alterierte Form der normalen Trichromasie (41, 43, 44). "Alteration" heißt hierbei, daß die Absorptionsbereiche bzw. Absorptionsmaxima der Zapfenpigmente über der Wellenlänge gegenüber denen der normalen Trichromaten verschoben sind.
Tritanomale besitzen ein anomales "Tritanolab", Deuteranomale ein anomales "Deutanolab" und Protanomale ein anomales "Protanolab" jeweils an Stelle der normalen Pigmente Cyanolab, Chlorolab bzw. Erythrolab. Bei der Tritanomalie ist vieles, ähnlich wie bei der Tritanopie, ungeklärt, dies besonders auch in genetischer Hinsicht.

B.2. Farbenraum, Farbvalenz und Farbsysteme

Die Bewertung der vorgegebenen Farbreize durch die drei Empfindlichkeitsfunktionen des Auges führt zu einer einheitlichen Wirkung, die "Farbvalenz" genannt wird (18).
Die Farbvalenz ist notwendig und hinreichend durch drei voneinander unabhängige Maßzahlen bestimmt (1. Graßmannsches Gesetz). Diese Bestimmungsgrößen erhält man, wenn man einen vorgegebenen Farbreiz, der in der linken Gesichtsfeldhälfte eines Meßgerätes erscheint, durch additive Farbmischung dreier willkürlich wählbarer Primärvalenzen auf der rechten ununterscheidbar nachmischt, so daß die benachbarten Feldhälften nach Farbton, Sättigung und Helligkeit übereinstimmen. Die Gleichheit dieser Farbfelder ist durch äußere Umstimmung, z.B. psychologischer oder physiologischer Art, nicht beeinflußbar (Persistenzsatz nach von Kries (89)).

Die beiden Farbreize in den zwei Gesichtsfeldhälften können von durchaus verschiedener physikalischer Beschaffenheit sein. Für die additive Farbmischung ist lediglich das Aussehen der drei Komponenten maßgebend, nicht ihre Zusammensetzung (3. Graßmannsches Gesetz). Demnach können zwei Farbreize von verschiedener spektraler Beschaffenheit die gleiche Farbempfindung hervorrufen. Dies führt mathematisch gesehen zu einer Äquivalenzrelation und zur Einteilung der Farbreizmenge in Klassen gleichaussehender oder "metamerer" Reize, nämlich der Farbvalenzen (mengentheoretische Formulierung des 3. Graßmannschen Gesetzes) (80, 81).

Dank der Tatsache, daß drei Farbvalenzen zur additiven Farbmischung ausreichend sind, lassen sich die Klassen metamerer Reize den Vektoren eines dreidimensionalen Vektorraums zuordnen (83). Es besteht somit zwischen den Farbvalenzen und den Elementen eines dreidimensionalen Vektorraums ein Isomorphismus.

Nun ist jedoch die sich anbietende Darstellung der Farbvalenzen im Vektorraum graphisch nur auf Kosten der Übersichtlichkeit möglich. Deshalb wird die sogenannte Farbtafel (115) verwendet. Dabei handelt es sich um eine zweidimensionale Projektion des dreidimensionalen Farbenraumes. Die Achsen, die den Farbenraum aufspannen, sind drei beliebig wählbare Einheitsvektoren, die sogenannten "Primärvalenzen". Die Punkte der Farbtafel (Farbörter) entsprechen den "Farbarten" der Farbvalenzen gleicher vektorieller Richtung im Farbenraum, unabhängig von ihrer Länge oder Helligkeit. Farbvalenzen von gleicher Farbart unterscheiden sich lediglich durch ihre Leuchtdichte (s. auch Abschnitt B.5.).

In der vorliegenden Arbeit verwende ich in Anlehnung an das Wrightsche WDW-System die Primärvalenzen $\vec{D}$(460 nm) im blauen Bereich, $\vec{E}$(530 nm) im grünen Bereich und $\vec{F}$(650 nm) im roten Bereich (115). Ein vollständiger Farbabgleich eines beliebigen Farbreizes läßt sich in Form folgender Vektorgleichung schreiben:

$$\vec{C} = D \cdot \vec{D} + E \cdot \vec{E} + F \cdot \vec{F}, \qquad (1)$$

wobei $\vec{D}$, $\vec{E}$, $\vec{F}$ die benutzten Einheitsvektoren, die schon genannten "Primärvalenzen", und D, E, F die zugehörigen skalaren Größen, die sogenannten "Farbwerte", darstellen. Die Schreibweise dieser Gleichung ist in Übereinstimmung mit den Empfehlungen der internationalen Beleuchtungskommission (CIE) (16).
Die Primärvalenzen $\vec{D}$, $\vec{E}$, $\vec{F}$ sind, spektral gesehen, durch die Interferenzfilter des verwendeten Dreifarbenmeßgerätes (12), intensitätsmäßig durch die zufälligen apparativen Eigenschaften des Dreifarbenmeßgerätes bestimmt. Um sich von diesen Zufälligkeiten frei zu machen, wird eine Intensitätsnormierung der drei Primärvalenzen nach physiologischen Kriterien vorgenommen. Die so normierten Primärvalenzen seien $\vec{B}$, $\vec{G}$, $\vec{R}$ genannt; sie sind beziehentlich von der gleichen Farbart wie $\vec{D}$, $\vec{E}$, $\vec{F}$. Nach der Normierung lautet eine Farbgleichung

$$\vec{C} = B \cdot \vec{B} + G \cdot \vec{G} + R \cdot \vec{R} \qquad (2)$$

Die hier auftretenden Farbwerte B, G, R sind mit den alten Farbwerten D, E, F verknüpft durch Gleichungen der Form

$$\begin{aligned} B &= C_1 D \\ G &= C_2 E \\ R &= C_3 F, \end{aligned} \qquad (3)$$

wobei der Koeffizient C_2 meistens gleich 1 gesetzt wird.
Im folgenden kommen sowohl Gleichungen und Angaben nach Gl. (1) und Gl. (2) vor. Wegen der Eindeutigkeit der Verknüpfung nach (3) sind sie in numerischer Hinsicht gleichwertig. Die Darstellung (2) läßt jedoch Vergleiche unabhängig von der verwendeten Apparatur zu.
Technische Einzelheiten der Normierung finden sich in Abschnitt D.3.

B.3. Prinzip der Fehlfarbenbestimmung

Die Dichromasie läßt sich in der Farbtafel durch einen speziellen Punkt charakterisieren, den sogenannten "Fehlpunkt". Dieser Fehlpunkt kann als Schnittpunkt von sogenannten "Verwechslungsgeraden oder "isochromatischen Linien" definiert werden. Demnach läßt sic dieser Punkt durch Bestimmung von zwei Verwechslungsgeraden darstellen (57, 92).
Alle Farben, die auf einer solchen Verwechslungsgeraden liegen und dabei gleich hell sind, sind für den jeweiligen Farbenfehlsichtigen ununterscheidbar, im Gegensatz zum normalen Trichromate der recht wohl einen Unterschied zwischen den verschiedenen Farbörtern einer Verwechslungsgeraden feststellen kann.
Da eine Gerade schon durch die Bestimmung zweier Punkte realisier ist, sind für die Darstellung des Fehlpunktes je zwei Farbarten pro Verwechslungsgerade, also insgesamt vier Farbarten nötig (94)

In der vorliegenden Arbeit bin ich jedoch experimentell nicht gemäß dieser geometrischen Konfiguration vorgegangen, sondern nach folgendem Prinzip (82): Mit Hilfe eines Dreifarbenmeßgerätes

mit den drei instrumentellen, reellen Primärvalenzen $\vec{D}$, $\vec{E}$, $\vec{F}$ wird ein vorgebener Farbreiz abgeglichen. Es ergebe sich folgende Farbgleichung

$$\vec{C}_o = D_o \vec{D} + E_o \vec{E} + F_o \vec{F}.$$

D_o, E_o, F_o seien dabei die zu den "blauen", "grünen" bzw. "roten" Primärvalenzen $\vec{D}$, $\vec{E}$, $\vec{F}$ gehörenden Farbwerte.

Nun werde dieser Farbabgleich abgeändert, indem z.B. der "grüne" Farbwert E variiert wird. Im Gegensatz zum Trichromaten gelingt es dem Dichromaten unter gewissen Kriterien allein durch Veränderung von D und F wieder einen Farbabgleich mit den Farbwerten D_1, E_1, F_1 zu erzielen (s. auch Abschnitt D.3.):

$$\vec{C}_1 = D_1 \vec{D} + E_1 \vec{E} + F_1 \vec{F}.$$

Für den Dichromaten sind die beiden Farbvalenzen $\vec{C}_o$ und $\vec{C}_1$ ununterscheidbar. Sie gehören für ihn zur gleichen Klasse, sie sind metamer (82). Bildet man nun die Differenz von $\vec{C}_o$ und $\vec{C}_1$, so ist sie für den Dichromaten gleich Null, d.h. er erkennt den Farbabgleich an. Die Farbwertdifferenzen zwischen $\vec{C}_o$ und $\vec{C}_1$ führen zu folgender Form eines Differenzvektors

$$\vec{\Delta} = (D_o - D_1) \vec{D} + (E_o - E_1) \vec{E} + (F_o - F_1) \vec{F},$$

Die Differenz der beiden Farbabgleiche, der Differenzvektor $\vec{\Delta}$, gibt unmittelbar die Richtung fehlender Farbunterscheidung, nämlich die "Fehlfarbe", an. Die Farbart der Fehlfarbe ist der sog. "Fehlpunkt".

B.4. Reduktion der Deuteranomalie auf die Deuteranopie

Das Farbensehen eines Dichromaten ist im Vergleich zu dem eines Trichromaten eingeschränkt, d.h. ihm fehlt die Unterscheidungsfähigkeit für eine ganze Reihe von Farbreizen.

Die Dichromaten gelten als Reduktionstypen der normalen Trichromaten. Ein dichromatischer Beobachter erkennt den Abgleich eines Trichromaten im allgemeinen an.

Während es sich beim trichromatischen Farbenraum um einen dreidimensionalen Vektorraum handelt, besteht der dichromatische Farbenraum nur aus einem zweidimensionalen Vektorraum. Der Übergang vom dreidimensionalen zum zweidimensionalen Raum läßt sich als Homomorphismus beschreiben (82). Bei dieser homomorphen Abbildung verschwindet eine Dimension vollständig, ein eindimensionaler Unterraum wird zu Null. Diese fehlende Dimension ist gekennzeichnet durch eine Linie fehlender Farbunterscheidung von einer ganz bestimmten Richtung, der Richtung der im vorhergehenden Abschnitt eingeführten Fehlfarbe; diese Richtung, genauer: die Gerade dieser Richtung durch den Ursprung, wird als "Kern" der homomorphen Abbildung bezeichnet.

Die Gleichung eines solchen Kerns lautet

$$\vec{C} = u\,\vec{f},$$

wo $\vec{f}$ den Vektor der Fehlfarbe, gleichbedeutend mit dem Differenzvektor $\vec{\Delta}$ des vorausgehenden Abschnitts, und u einen freien Parameter bedeutet.

Durch geeignete Wahl von u im Bereich $-\infty < u < +\infty$ kann man jeden Punkt der durch den Ursprung laufenden Geraden erreichen.

Die allgemeine Form einer Reduktion der Trichromasie auf eine Dichromasie ist die folgende (94):

$$K = a_{11}\, B + a_{12}\, G + a_{13}\, R$$

$$W = a_{21}\, B + a_{22}\, G + a_{23}\, R\ ,$$

wo K, W Farbwerte bezogen auf dichromatische Primärvalenzen $\vec{K}$ ("kalte" Farben) und $\vec{W}$ ("warme" Farben) und B, G, R trichromatische Farbwerte sind. Die a_{11}, a_{12} usw. sind die Koeffizienten dieser linearen Abbildung.

Dieses Gleichungssystem sei durch den Kern

$$\vec{C} = u\ \vec{f}$$

bestimmt. Der Richtungsvektor $\vec{f}$ der mittleren Fehlfarbe laute

$$\vec{f} = B_F\, \vec{B} + G_F\, \vec{G} + R_F\, \vec{R}$$

mit B_F, G_F, R_F als Farbwerten der Fehlfarbe. Durch Übergang von der vektoriellen in die skalare Ausdrucksweise der Gleichung $\vec{C} = u\ \vec{f}$,

$$B = u\ B_F$$

$$G = u\ G_F$$

$$R = u\ R_F$$

und durch Elimination des freien Parameters u erhält man die gesuchte Abbildungsgleichung in ihrer homogenen Form

$$O = G_F\, B - B_F\, G$$

$$O = -R_F\, G + G_F\, R$$

Diese Gleichung gilt nun zunächst nur für Farbvektoren, die dem Kern angehören. Sie werden, wie man sieht, auf den Null-

punkt des Bildraumes abgebildet. Für eine beliebige Farbe erhalte wir die endgültige inhomogene Form unserer Abbildungsgleichung, diesmal als Matrizengleichung geschrieben,

$$\begin{pmatrix} K \\ W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_F & -B_F & O \\ O & -R_F & G_F \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B \\ G \\ R \end{pmatrix}$$

Die Deuteranomalen bilden nun jedoch keine Reduktionsformen der normalen Trichromasie; sie erkennen die Abgleiche eines Trichromaten keineswegs an. Bei ihnen wird die Menge der Farbreize zu anderen Klassen metamerer, gleichaussehender Reize zusammengefaßt. Der deuteranomale Farbenraum kann somit auch nicht im normalen trichromatischen Vektorraum beschrieben werden, etwa durch den Verlust einer Dimension oder einer gewissen Menge von Farbreizen.

Trotzdem kann man an anomalen Trichromaten in der Regel begrenzte Stücke von Verwechslungsgeraden bestimmen und ihnen damit ein Analogon zur Fehlfarbe zuordnen (92, 94). Daher haben die vorstehenden Ausführungen auch für anomale Trichromaten einen gewissen Sinn.

Im Falle einer Deuteranomalie beschreiben die Abbildungsgleichungen den Übergang von einem deuteranomalen Farbenraum auf einen deuteranopischen Farbenraum, der das Farbensehen des Deuteranomal bei unterdrücktem mittlerem (grünen) Farbmechanismus beschreibt.

B.5. Prinzip der Alychnenbestimmung

Das empirisch bestimmte Abneysche Gesetz (1, 2) für die Leuchtdichte lautet

$$L = \beta B + \gamma G + \varrho R$$

Dies sagt aus, daß die auf die Primärvalenzen $\vec{B}, \vec{G}, \vec{R}$ bezogenen Farbwerte B, G, R jeweils einen bestimmten Betrag zur Gesamtleuchtdichte L einer Farbvalenz liefern, und zwar proportional zur Größe des Farbwertes. Die Proportionalitätsfaktoren β, γ und ϱ gelten bezogen auf das verwendete Primärvalenzsystem und heißen "Leuchtdichtebeiwerte".
Es ist möglich, Farbvalenzen mit gleicher Leuchtdichte zusammenzufassen. Eine solche Klasse von Farbvektoren bildet dabei mit ihren Endpunkten eine Ebene im dreidimensionalen Farbenraum mit konstanter Helligkeit. Eine solche Ebene wird als "Isolychne" bezeichnet. Für konstante Werte von L, β, γ und ϱ und variable Werte von B, G und R beschreibt die angegebene Gleichung eine solche Isolychne. Die "Alychne" ist diejenige Isolychnenebene, die den Nullpunkt enthält.

Die (trichromatische) Alychne bildet einen zweidimensionalen Unterraum des trichromatischen Farbenraums. Kennt man ihn, so läßt sich der dreidimensionale Farbenraum auf einen eindimensionalen abbilden. Die Alychne ist somit der Kern einer solchen Abbildung.

Die Ebene der Alychne kann mit Hilfe zweier unabhängiger, leuchtdichtefreier Farbvektoren aufgespannt werden (95):

$$\vec{C} = u \vec{f} + v \vec{q},$$

wo u und v freie Parameter sind.
Der Differenzvektor $\vec{f}$ ist die Fehlfarbe und liefert den ersten zu bestimmenden Farbvektor. Da ununterscheidbare Farben auch gleich hell sind, liegt $\vec{f}$ auch in einer Ebene gleicher Helligkeit oder gleicher Leuchtdichte.
Der zweite Vektor, der "Quervektor" $\vec{q}$, kann mit Hilfe eines heterochromen Gleichhelligkeitsabgleichs ermittelt werden. Bedingung ist für diesen Differenzvektor, daß er nicht parallel zum Fehlfarbenvektor $\vec{f}$ sein darf.

Die experimentelle Ermittlung des Quervektors erfolgt folgendermaßen (58, 92): Auf der linken Photometerhälfte wird ein Farbreiz angeboten und mit Hilfe der Farbe mit den Farbwerten D_1, E_1, F_1 rechts nachgemischt. Unter Beibehaltung der rechten Seite wird links ein neuer Farbreiz dargeboten. Die Aufgabe der Versuchsperson besteht nun darin, die Ausgangsfarbe, die rechts noch realisiert ist, mit der neuen Farbe ungleicher Farbart auf der linken Seite heterochrom auf gleiche Helligkeit einzustellen.

Im nächsten Schritt erhält die Versuchsperson den Auftrag, die linke Farbe isochrom nachzumischen. Es ergeben sich drei neue Farbwerte D_2, E_2, F_2.
Für die beiden Farben

$$\vec{C}_1 = D_1 \vec{D} + E_1 \vec{E} + F_1 \vec{F} \quad \text{und}$$
$$\vec{C}_2 = D_2 \vec{D} + E_2 \vec{E} + F_2 \vec{F}$$

gilt, daß sie bei verschiedener Farbart doch gleiche Helligkeit besitzen, ihre Differenz $\vec{C}_1 - \vec{C}_2$ somit, wie gefordert, die Leuchtdichte Null besitzt.

Im Experiment tritt in der Regel beim isochromen Abgleich eine geringfügig andere Helligkeitseinstellung auf als beim heterochromen Abgleich. Zur Umrechnung wird der Faktor

$$H = \frac{\text{Helligkeit heterochrom}}{\text{Helligkeit isochrom}}$$

eingeführt, mit dem die Farbwerte D_2, E_2, F_2 multipliziert werden und damit auf die Helligkeit von $\vec{C}_1$ umgerechnet werden.

Für den Quervektor $\vec{q}$ ergibt sich als Differenzvektor $\vec{C}_1 - \vec{C}_2$ folgende Form

$$\vec{q} = (D_1 - D_2\, H)\, \vec{D} + (E_1 - E_2\, H)\, \vec{E} + (F_1 - F_2\, H)\, \vec{F}.$$

Durch Übergang von dem (D, E, F)-System in das (B, G, R)-System und durch Richtungsmittelung der verschiedenen Quervektoren nach dem Verfahren der Schlußlinie (29) kommt man zu folgender Form der Gleichung für den mittleren Quervektor

$$\vec{q} = B_q\, \vec{B} + G_q\, \vec{G} + R_q\, \vec{R}.$$

Wie oben für die Fehlfarbe $\vec{f}$, so gilt auch für den Quervektor $\vec{q}$, daß er in einer Ebene gleicher Helligkeit liegt und somit keine Leuchtdichte trägt.

Mit der Fehlfarbe $\vec{f}$ und dem Quervektor $\vec{q}$ ist die Alychne, wie eingangs dieses Abschnitts gesagt, bestimmt. Im folgenden Abschnitt wird gezeigt, wie mit der Alychne, als Abbildungskern aufgefaßt, eine Abbildung auf ein bloßes Helligkeitssehen durchgeführt werden kann.

B.6. Reduktion der anomalen Trichromasie auf ein eindimensionales reines Helligkeitssehen

Das Ziel unseres Vorgehens ist, das dreidimensionale Farbensehen auf ein eindimensionales bloßes Helligkeitssehen zu reduzieren (95, 100). In Anlehnung an die Ausführungen in Abschnitt B.4. beschreibt diesmal die Alychne den Kern der zu bestimmenden homomorphen Abbildung (81). Dieser ist ein zweidimensionaler Unterraum des Vektorraums der Farben und verschwindet bei der Abbildung des dreidimensionalen Farbenraums auf den gesuchten eindimensionalen. Die Gleichung des Kerns ist folglich identisch mit der der Alychne (Abschnitt B.5.)

$$\vec{C} = u\,\vec{f} + v\,\vec{q}$$

Die beiden Richtungsvektoren $\vec{f}$, die mittlere Fehlfarbe, und $\vec{q}$, der zu $\vec{f}$ nicht parallele mittlere Quervektor, spannen vom Nullpunkt angetragen die Alychnenebene mit der Leuchtdichte L = O auf

$$\text{Mittlere Fehlfarbe} \quad \vec{f} = B_F\,\vec{B} + G_F\,\vec{G} + R_F\,\vec{R}$$

$$\text{Mittlerer Quervektor} \quad \vec{q} = B_Q\,\vec{B} + G_Q\,\vec{G} + R_Q\,\vec{R}$$

Durch Übergang von der vektoriellen in die skalare Ausdrucksweise

$$B = u\,B_F + v\,B_Q$$

$$G = u\,G_F + v\,G_Q$$

$$R = u\,G_F + v\,R_Q$$

und durch Auflösen dieser drei Gleichungen, d.h. durch Eliminieren der freien Parameter u und v, erhalten wir die gesuchte Abbildungsgleichung in ihrer homogenen Form:

$$O = (G_F R_Q - R_F G_Q)\ B + (R_F B_Q - B_F R_Q)\ G + (B_F G_Q - G_F B_Q)\ R$$

Diese Gleichung gilt zunächst nur für die Farben, die in der Alychnenebene liegen. Für eine beliebige Farbe erhalten wir die endgültige inhomogene Form unserer Abbildungsgleichung

$$L = (G_F R_Q - R_F G_Q)\ B + (R_F B_Q - B_F R_Q)\ G + (B_F G_Q - G_F B_Q)\ R$$

Diese Gleichung entspricht der empirisch bestimmten Abneyschen Gleichung der Leuchtdichte

$$L = \beta \cdot B + \gamma \cdot G + \varrho \cdot R$$

Für die Leuchtdichtebeiwerte β, γ und ϱ ergibt sich

$$\beta = G_F R_Q - R_F G_Q$$

$$\gamma = R_F B_Q - B_F R_Q$$

$$\varrho = B_F G_Q - G_F B_Q$$

Wie für jede beliebige Farbe, so gelten die obigen Transformationen selbstverständlich auch für den speziellen Fall einer Spektralfarbe.

B.7. Schnittspur der Alychne mit der Farbtafel

Die Ebene der Alychne schneidet die Einheitsebene $B + G + R = 1$, d.h. die Farbtafel, in einer Geraden. Diese Gerade heißt "Spur der Alychne" oder auch "Alychnenspur" (69, 95).
Ihre Gleichung erhält man, wenn man die Gleichung der Alychne in die Gleichung der Einheitsebene einsetzt.

Einheitsebene: $B + G + R = 1$

Alychnenebene: $\beta \cdot B + \gamma \cdot G + \rho \cdot R = 0$

Durch Einsetzen folgt:

$\beta (1 - G - R) + \gamma \cdot G + \rho \cdot R = 0$

$\beta - \beta\ G - \beta\ R + \gamma \cdot G + \rho \cdot R = 0$

Infolge der Identifikation der Einheitsebene mit der Farbtafel kann man von den Farbwerten B, G, R zu den Farbwertanteilen b, g, r übergehen.

Daraus folgt:

$\beta - \beta \cdot g - \beta \cdot r + \gamma \cdot g + \rho \cdot r = 0$

Man erhält dann die Gleichung der Alychnenspur in der Form einer Geradengleichung, die die Farbörter der mittleren Fehlfarbe und des mittleren Quervektors enthält:

$$\boxed{g = \frac{\beta - \rho}{\gamma - \beta} \cdot r - \frac{\beta}{\gamma - \beta}} \quad ,$$

wo g die Ordinate ("grüner" Farbwertanteil) und r die Abszisse ("roter" Farbwertanteil) bedeuten. $\frac{\beta - \rho}{\gamma - \beta}$ ist die Steigung und $(-\frac{\beta}{\gamma - \beta})$ ist der Ordinatenabschnitt der Geraden.

B.8. Prinzip der Spektralwertbestimmung

Ein vollständiger Farbabgleich eines beliebigen Spektralreizes, durch einen Monochromator erzeugt, läßt sich in Form der schon bekannten Vektorgleichung schreiben.

$$\vec{C} = B \cdot \vec{B} + G \cdot \vec{G} + R \cdot \vec{R}$$

Hierbei ist zu berücksichtigen, daß durch die Wahl der reellen Primärvalenzen $\vec{D}$(460 nm), $\vec{E}$(530 nm) und $\vec{F}$(650 nm) — nach der Normierung $\vec{B}$(460 nm), $\vec{G}$(530 nm) und $\vec{R}$(650 nm) — annähernd alle Spektralfarben als Vektoren außerhalb des von $+\vec{B}$, $+\vec{G}$, $+\vec{R}$ gebildeten Oktanten liegen. Das bedeutet, daß die Spektralfarben fast nie alleine durch die additve Mischung der drei Primärvalenzen erzeugt werden können (68). Deshalb ist bei der Spektralwertbestimmung das Verfahren der äußeren Farbmischung nötig, d.h. mindestens einer der drei Farbwerte ist negativ. Diese negative Mischungskomponente wird erzeugt, indem der zu messenden monochromatischen Strahlung die jeweils benötigte Primärvalenz zugemischt wird.

Ein Beispiel soll das Verfahren der äußeren Farbmischung verdeutlichen.

$$\vec{C}_{\text{Monochr.}} + R\cdot\vec{R} = B\cdot\vec{B} + G\cdot\vec{G}$$

Diese Gleichung kann auch wie folgt geschrieben werden

$$\vec{C}_{\text{Monochr.}} = B\cdot\vec{B} + G\cdot\vec{G} - R\cdot\vec{R},$$

wobei nun die "rote" Primärvalenz mit negativem Farbwert erscheint.

Statt $\vec{R}$ kann natürlich auch $\vec{G}$ oder $\vec{B}$ mit einem negativen Farbwert auftreten.

Die spektralen Farbwerte einer vorgegebenen Strahlungsverteilung werden auf das sog. isoenergetische Spektrum umgerechnet. Dabei muß die Strahlungsverteilung $S(\lambda)$ des benutzten Monochromators bekannt sein.

Die gesuchten Spektralwerte $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{r}(\lambda)$ ergeben sich dann definitionsgemäß, wenn man die gemessenen spektralen Farbwerte

$B(\lambda)$, $G(\lambda)$, $R(\lambda)$ durch die relative spektrale Strahlungsverteilung $S(\lambda)$ dividiert (69):

$$\bar{b}(\lambda) = \frac{B(\lambda)}{S(\lambda)}$$

$$\bar{g}(\lambda) = \frac{G(\lambda)}{S(\lambda)}$$

$$\bar{r}(\lambda) = \frac{R(\lambda)}{S(\lambda)}$$

Trägt man diese Werte als Ordinaten über der Wellenlänge auf und verbindet man die blauen, grünen und roten Spektralwertpunkte, so erhält man den typischen Verlauf von drei Spektralwertfunktionen (s. dazu die Abb. 10 bis 15). Für einen Spektralfarbreiz $\vec{F}(\lambda)$ aus einem isoenergetischen Spektrum ergibt sich somit folgende Gleichung, die sogenannte "Farbtüte"

$$\vec{F}(\lambda) = \bar{b}(\lambda)\cdot\vec{B} + \bar{g}(\lambda)\cdot\vec{G} + \bar{r}(\lambda)\cdot\vec{R}$$

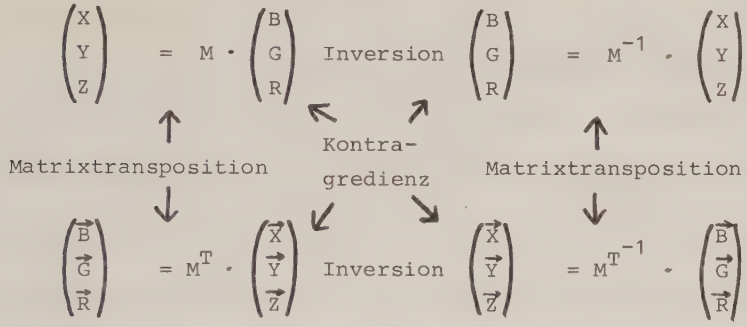
Trägt man die Farbwertanteile der einzelnen spektralen Farbwerte in die schon bekannte Farbtafel ein, so erhält man den Spektralfarbenzug. Innerhalb oder zumindest auf diesem konkaven Kurvenzug liegen die Farbörter aller herstellbaren Farbvalenzen. Die Verbindung der beiden Spektrumsenden bildet die sog. Purpurgerade eine Mischung des langwelligen roten Endes mit dem kurzwelligen blauvioletten Spektrumsende.

B.9. Wechsel des Bezugssystems

Bisher gelten alle vorgenommenen Berechnungen nur für das Wrightsche BGR-System.

Ein Wechsel des Bezugssystems, zunächst für die Werte eines normalen Trichromaten, in das internationale Normvalenzsystem

CIE 1931 verläuft nach den Regeln der Matrizenrechnung (13, 79).



Dabei ist M^{-1} die inverse Matrix zu M. Transposition bedeutet eine Vertauschung von Spalten mit Zeilen, Kontragredienz steht für das Hintereinanderausführen beider Operationen.
Die Leuchtdichtebeiwerte transformieren sich wie die Primärvalenzen (96).

B.10. Testverfahren zum interindividuellen Vergleich von anomalen Trichromaten nach von Kries, modifiziert nach Alpern et al.

Von Kries (44) stellte die Methode der grün/roten Quotientenbildung vor. Dabei wird für zwei Versuchspersonen das Farbwertverhältnis Grün zu Rot ($\bar{g}(\lambda)/\bar{r}(\lambda)$) für eine bestimmte Wellenlänge im rot-grünen Bereich ermittelt. Von Kries vergleicht nun die Abgleiche der zwei Versuchspersonen miteinander, indem er das Farbwertverhältnis $\bar{g}_1(\lambda)/\bar{r}_1(\lambda)$ der ersten durch das Farbwertverhältnis $\bar{g}_2(\lambda)/\bar{r}_2(\lambda)$ der zweiten dividiert: $\bar{g}_1(\lambda)/\bar{r}_1(\lambda) : \bar{g}_2(\lambda)/\bar{r}_2(\lambda)$. Unter der Voraussetzung, daß die Abweichungen zwischen den beiden Versuchspersonen nur durch die Strahlungsabsorption in den Augenmedien hervorgerufen sind, müßte der Doppelquotient für verschiedene Wellenlängen stets der gleiche, d.h. ein konstanter Zahlenwert sein, der wellenlängenunabhängig ist.

Bekanntermaßen widerlegte von Kries bei der Untersuchung verschiedener Deuteranomaler das Vorhandensein eines solchen konstanten Faktors und schloß so auf die Alteration der "optischen Substanzen" bei Deuteranomalen gegenüber normalen Trichromaten. Bei Alpern und Pugh (7, 9) findet man eine Ausdehnung dieses Versuchsansatzes, die auf Moeller zurückgeht. Das Testverfahren dient zum interindividuellen Vergleich von anomalen Trichromaten. Es werden in einem beliebig großen Bereich die Farbwerte für verschiedene Wellenlängen ermittelt. Nun wird der "grüne" Farbwert durch den "roten" Farbwert der jeweiligen Wellenlänge dividiert. Danach wird dieser Quotient logarithmiert. Nun wird die Differenz der logarithmischen Grün/Rot-Quotienten zwischen zwei anomalen Trichromaten gebildet.

Wenn Δ die Differenz der logarithmischen Quotienten für zwei Beobachter bei einer gegebenen Wellenlänge ist, und σ_Δ^2 das Quadrat der geschätzten Standardabweichung der jeweiligen Differenz ist, gilt gemäß Moeller (7) folgender statistischer Test

$$S(k) = \sum \frac{(k-\Delta)^2}{\sigma_\Delta}$$

für einen Wert $k = k'$ (= die zu erwartende "Konstante"), so daß die Summe S(k) ein Minimum wird. Für die Überprüfung der Nullhypothese, daß die Quotienten sich nur durch einen konstanten Faktor unterscheiden, entspricht die Verteilung S(k) der einfachen χ^2-Verteilung mit unterschiedlich vielen Freiheitsgraden (Zahl der Wellenlängen minus Eins = Freiheitsgrade FG).

In Abschnitt E.7. wird über das Ergebnis der von mir so untersuchten Deuteranomalen berichtet.

B.11. Charakterisierung der Deuteranomalie

B.11.a. Genetischer Aspekt

Nach dem Prinzip der X-chromosomal rezessiven Vererbung kann sich eine Farbenfehlsichtigkeit, z.B. die Deuteranomalie, nur dann ausprägen, wenn sie nicht durch ein normales Allel überlagert wird (35, 40, 60). Bei Frauen ist deshalb eine Farbenfehlsichtigkeit ziemlich selten, weil homozygotes Auftreten der Merkmalsträger für eine Farbempfindungsstörung erforderlich ist. Im heterozygoten Zustand können Mütter jedoch 50 % ihrer Söhne das Merkmal übertragen, und dieses prägt sich dann auf Grund eines fehlenden Partnerallels aus.

Die deuteranomalen Merkmalsträger bilden untereinander eine sehr heterogene Gruppe. Dies führte dazu, daß die Begriffe "einfache" und "extreme" Deuteranomalie eingeführt worden sind (21). Dabei ist die Deuteranomalie ihrer Dominanz nach folgendermaßen absteigend geordnet: normale Trichromasie - einfache Deuteranomalie - extreme Deuteranomalie - Deuteranopie.

Watson (110) spricht von einer "einfachen" Klasse, die durch eine verschobene mittelwellige Grünkurve und durch sehr große Genauigkeit in ihren Einstellungen gekennzeichnet ist. Seine "extreme" Deuteranomalie-Klasse zeichnet sich durch eine reduzierte Grünempfindung mit damit verbundener unsicherer Einstellung aus.

Auch Abney (2) beschreibt das Wesen der Deuteranomalie als Empfindungsverlust von etwa einem Sechstel bis zu einem Drittel im mittelwelligen Grünbereich.

Walls und Mathews (105) hingegen glauben nicht an eine Empfindungsschwäche im grünen Bereich gegenüber dem Normalen oder etwa eine Reduktion der Rezeptoranzahl oder gar an eine Verminderung der Konzentration der photochemischen Zapfensubstanz. Bei allen diesen Veränderungen gegenüber dem Normalen müßten, nach Walls und Mathews, Deuteranomale nämlich die Abgleiche von normalen Trichromaten anerkennen, was nicht der Fall ist. Somit bleibt zur Charakterisierung der Deuteranmalie die Alteration der mittelwelligen Grünkurve.
Walls und Mathews sehen jedoch ebenfalls eine Einteilung der Deuteranomalen in zwei Klassen, in die "einfache" Deuteranomalie (DA) und in die "extreme" Deuteranomalie (EDA). Dabei beziehen sie sich auf Anomaloskopabgleiche einzelner Farbenfehlsichtiger: "Extreme" Deuteranomale haben keinen stabilen rot-grünen Anomaloskopabgleich, sie verwechseln über einen weiten Bereich, während "einfache" Deuteranomale nur in sehr engen Grenzen "umstimmbar" sind.

B.11.b. Anomalquotient

Der Einteilung von Nagel (53) folgend, lassen sich extreme und einfache Deuteranomale durch ihren Anomalquotienten unterscheiden. Am Anomaloskop mit zweigeteiltem Gesichtsfeld wird der Versuchsperson ein gelber monochromatischer Testreiz der Wellenlänge 589 nm im unteren Gesichtsfeld angeboten. In der oberen Hälfte besteht die Möglichkeit der Nachmischung aus Rot (λ = 671 nm) und Grün (λ = 546 nm). Durch Einstellung der Mischfarbe mit

Hilfe eines Drehknopfes und durch Variieren der Helligkeit des vorgegebenen Gelbreizes soll die Versuchsperson beide Hälften abgleichen. Die Skala des rot-grünen Drehknopfes reicht von O bis 73. Es gilt dabei, daß die Eisntellung O einem maximalen Grünanteil entspricht und die Einstellung 73 einem maximalen Rotanteil.

Der Anomalquotient (AQ) bietet die Möglichkeit einer Differenzierung der unterschiedlichen anomalen trichromatischen Typen. Wenn r der Rotanteil, g der Grünanteil, mit der Bedingung r + g = 73, bedeutet, so ist der AQ definiert als

$$AQ = \frac{\frac{g}{r}}{\left(\frac{g}{r}\right)_N} = \frac{\frac{73 - r}{r}}{\left(\frac{73 - r}{r}\right)_N}$$

Der Nenner ist dabei druch eine normalsichtige Person einzustellen, besser durch Mittelung mehrerer Farbennormalsichtiger. Für die Deuteranomalen ergeben sich Wertebereiche für den AQ, die unterschiedlich groß sind, je nach ihrer Umstimmbarkeit, d.h. ob sie nun einfache oder extreme Anomale sind (17, 91). Dabei spricht man von "extrem", wenn die Deuteranomalen Gleichheit zwischen Mischfarbe und gelbem Testreiz bis zu der extremen Einstellung O, d.h. bis zum reinen Grün anerkennen.

Hurvich (32) geht in seinen Äußerungen zur Klasseneinteilung der Deuteranomalie noch einen Schritt weiter. Die "einfache" Anomalie beruht nach ihm auf einer Abweichung des Anomaloskopabgleichs, der sich auf Rezeptor-Ebene abspielt. Die "extreme" Deuteranomalie ist gekennzeichnet durch eine erhebliche Umstimmbarkeit, die sich postrezeptoriell durch einen neuronalen Empfindungsverlust auszeichnet.

B.11.c. Fusions- und Ausfallhypothese

Die Deuteranopie ist ein Extremfall der Deuteranomalie, wo zu einer neuronalen Schwäche zusätzlich eine photochemische Alteration auf Rezeptor-Ebene kommt (32).
Für die Deuteranopie ist seit den Publikationen von Fick und Leber (20, 47) die Fusionshypothese zur Erklärung des Defektes im Gespräch, d.h. es gebe wohl noch alle drei Pigmente auf Rezeptor-Ebene, allerdings liege auf neuronaler Synapsen-Ebene ein "Kollaps" vor, der zur Fusion des rot-grünen Systems führe.

Eine Erklärung für die Deuteranopie auf Rezeptor-Ebene ist die Ausfallhypothese, d.h. ein Fehlen des photochemischen Übertragungsmechanismus für den grünen Bereich.

B.11.d. Cluster-Hypothese

Das Wort "Cluster" wurde von Alpern et al. (8, 9, 10) eingeführt. Sie benutzen diesen Ausdruck, um ihre nicht einheitlichen Ergebnisse an Deuteranopen und Deuteranomalen zu beschreiben. Ihre Deuteranopen zeigen kein einfaches einheitliches Erythrolab. Das Pigment der Deuteranopen im langwelligen Bereich ist nicht identisch mit dem des Normalen, da nur eine von sechs dichromatischen Kurven der des Normalen entspricht. Ähnliche, teilweise noch nicht abgeschlossene Untersuchungen betreffen Protanope und das mittelwellige Pigment Chlorolab.
Alpern et al. folgern daraus, daß die Pigmente Erythrolab und Chlorolab jeweils in einem "Cluster" vorliegen, d.h., daß sie, wörtlich übersetzt, in "Büschelform" angeordnet sind. Für das kurzwellige Cyanolab können die Autoren dies noch nicht endgültig

aussagen. Für die von ihnen untersuchten Deuteranomalen nehmen sie ein normales kurzwelliges Pigment und zwei langwellige Pigmente an, die beide aus dem langwelligen Erythrolab-Cluster stammen sollen (10).

Durch das Konzept des Sehpigment-Clusters wird der Begriff der Alteration eines Sehpigments etwas verschwommen, weil z.B. weit auseinanderliegende, einem Cluster angehörende Pigmente als alteriert aufgefaßt werden können. Eine genaue Kennzeichnung verschiedener Deuteranomalie-Ausprägungen wird dadurch nicht erleichtert.

C. Aufgabenstellung

Folgende psychophysische Untersuchungen zur Deuteranomalie sollen durchgeführt werden:

1) Bestimmung der Fehlfarbe und Alychne von vier Deuteranomalen. Die Theorie des anomalen trichromatischen Farbenraums im Vergleich zum dichromatischen soll in Verbindung mit der Fusions- und Ausfallhypothese dargestellt werden.

2) Entstammen die vier Deuteranomalen einer gemeinsamen Population? Eine Überprüfung der Homogenität der Fehlfarben mit Hilfe des H-Tests von Kruskal und Wallis soll durchgeführt werden.

3) Transformation der Meßergebnisse vom Wrightschen WDW-System in das internationale CIE-System. Ist eine solche Transformation sinnvoll?

4) Bestimmung von Spektralwertfunktionen von vier Deuteranomalen. Welche Unterschiede ergeben sich zu den trichromatischen Funktionen des CIE-Normalbeobachters von 1931? Welche Alterationen ergeben sich im Vergleich mit anderen Autoren?

5) Aufstellung von Reduktionsgleichungen und Reduktion der unter 4) gemessenen Daten mit Rückschluß auf die Hellempfindlichkeitsfunktionen der Deuteranomalen. Welche Pigmente tragen zu diesen Kurven bei?

6) Vergleich des Grün/Rot-Quotienten von zwei ausgesuchten deuteranomalen Brüdern nach der von Kriesschen Methode, modifiziert nach Alpern und Moeller. Ergeben sich unter Berücksich-

tigung der Vererbungsgesetze neue Aspekte für eine Charakterisierung der Deuteranomalie?

7) Gibt es sog. "Cluster" der einzelnen Pigmente?

8) Beruht das Phänomen der Deuteranomalie auf der Alterierung nur des mittleren, sog. anomalen Sehpigments (klassische Auffassung) oder kommen auch zusätzlich Alterationen des langwelligen Sehpigments vor?

9) Wie können die sog. einfache und die sog. extreme Deuteranomalie gekennzeichnet werden?

D. Versuchsdurchführung

D.1. Versuchspersonen

Die Versuchspersonen waren Schüler und Studenten.
Sie zeigten am Nagelschen Anomaloskop (52) eine ausgeprägte Deuteranomalie. Größere Variationen waren bezüglich ihrer Umstimmbarkeit zu verzeichnen, die mittelstark, halb extrem bzw. voll extrem war (19).

H.S., männlich, 23 Jahre, Deuteranomaler mit mäßig sicherer bis unsicherer Einstellung (absolute Einstellungsbreite = 8 Teilstriche); halbextreme Umstimmbarkeit bis zur roten Grenzgleichung (relative Einstellungsbreite = 63 Teilstriche), für seinen Anomalquotienten (AQ) galt: $2,2 \leqq AQ \leqq 3,9$.

M.B., männlich, 18 Jahre, Deuteranomaler mit mäßig sicherer Einstellung (absolute Einstellungsbreite = 6 Teilstriche); halbextreme Umstimmbarkeit bis zur grünen Grenzgleichung (relative Einstellungsbreite = 55 Teilstriche), $1,8 \leqq AQ \leqq 2,5$.

R.H., männlich, 17 Jahre, Deuteranomaler mit mäßig sicherer Einstellung (absolute Einstellungsbreite = 6 Teilstriche); starke Umstimmbarkeit (relative Einstellungsbreite = 14 Teilstriche), $2,3 \leqq AQ \leqq 3,6$.

K.S., männlich, 27 Jahre, Deuteranomaler mit sehr unsicherer Einstellung (absolute Einstellungsbreite = 10 Teilstriche); voll extreme Umstimmbarkeit bis zur grünen und roten Grenzgleichung (relative Einstellungsbreite = 73 Teilstriche), $2,1 \leqq AQ \leqq 4,2$.

D.2. Apparatur

Als Apparatur diente ein modifiziertes Dreifarbenmeßgerät nach Beck und Richter (12), vgl. Abb. 3.
Durch die Öffnung AP sieht die Versuchsperson ein kreisrundes, in der Mitte senkrecht geteiltes Gesichtsfeld.
In der linken Gesichtsfeldhälfte werden Farbreize $\vec{C}$ vorgegeben (Abb. 2), die durch verschiedene Filter im sog. Entsättigungsstrahlengang zwischen den Umlenkprismen U_1 und U_2 und/oder im Probenstrahlengang zwischen P und U_3 erzeugt wurden. Die beiden Strahlengänge wurden durch den Mischwürfel M, der an Stelle der Spiegelplatte Sp benutzt wurde, vereinigt. Die angebotenen Farbreize wurden auf der rechten Feldhälfte mit Hilfe von drei instrumentellen Primärvalenzen nachgemischt (115). Diese waren durch die Interferenzfilter $F_{1,2,3}$ realisiert (Hersteller: Jenaer Glaswerke Schott & Gen., Mainz). Für Blau wurden zwei Doppelbandfilter vom Typ Depal benutzt: a) λ_{max} = 459 nm, HW = 18 nm, b) λ_{max} = 458 nm, HW = 18 nm; für Grün ebenfalls zwei Doppelbandfilter vom Typ Depal: c) λ_{max} = 531 nm, HW = 16 nm, d) λ_{max} = 531 nm, HW = 16 nm; und für Rot zwei Bandfilter des Typs Pal: e) λ_{max} = 651 nm, HW = 22 nm, f) λ_{max} = 652 nm, HW = 21 nm.

Die Abweichungen von den Wrightschen Primärvalenzen Blau (460 nm), Grün (530 nm) und Rot (650 nm) wurden vernachlässigt.

Als Lichtquelle diente eine Wolfram-Halogen-Glühlampe (G), die die Mattglas-Streuscheibe (SS) beleuchtete. Die additive Mischung der drei Primärvalenzen, d.h. das von den Interferenzfiltern

durchgelassene Licht, erfolgte über das rotierende Prismensystem RP. Über den Lummer-Brodhun-Würfel LB wurden beide Strahlengänge nebeneinander, als linkes und rechtes Gesichtsfeld, in der Öffnung AP sichtbar. Streng foveales Sehen wurde durch eine Gesichtsfeldblende GB erreicht, die das Feld auf einen Durchmesser von $1,7^{o}$ begrenzte.

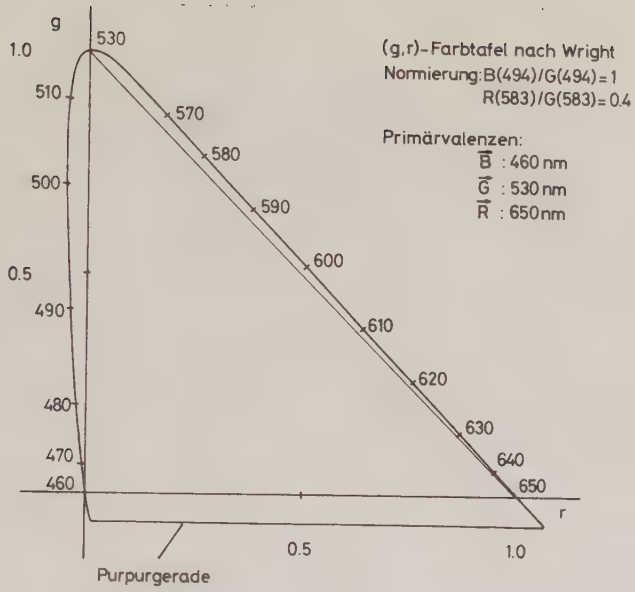


Abb. 1: (g,r)-Farbtafel nach Wright in der Normierung B(494)/G(494) = 1 und R(583)/G(583) = 0,4. Der Spektralfarbenzug und die Purpurgerade sind eingezeichnet.

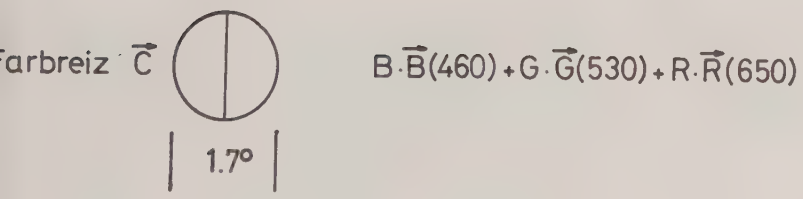
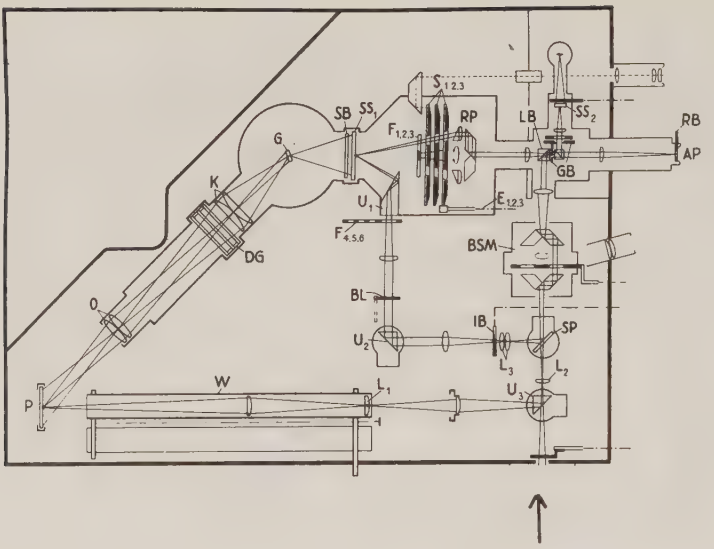


Abb. 2: Gesichtsfeld des Dreifarbenmeßgerätes von Abb. 3.



monochromatische
Strahlung
(Gittermonochromator)

Abb. 3: Modifiziertes Dreifarbenmeßgerät nach Guild-Bechstein (12). Erläuterung der Abkürzungen: AP - Austrittspupille, Bl - Blende, BSM - Brodhun-Sektorenmeßvorrichtung, DG - Davis-Gibson-Filter, $E_{1,2,3}$ - Triebknöpfe, $F_{1,2,3}$ - Farbfilter, $F_{4,5,6}$ - Farbfilter, G - Wolfram-Halogen-Glühlampe, GB - Gesichtsfeldblende, IB - Irisblende, K - Kondensor, L_1,L_2,L_3 - Linsen, LB - Lummer-Brodhun-Würfel, O - Objektiv, P - Probe, RB - Revolverblende, RP - rotierendes Prismensystem, $S_{1,2,3}$ - Sektorenpaare, SB - Siebplatte, SP - Spiegelplatte, SS_1,SS_2 - Streuscheiben, U_1,U_2,U_3 - Umlenkprismen, W - Wechseloptik.

Der sog. "Entsättigungsstrahlengang" führt über die Umlenkprismen U_1 und U_2. Der "Probenstrahlengang" wird über P und U_3 umgelenkt. Die Spiegelplatte SP kann wahlweise durch einen Mischwürfel M ersetzt werden, der die beiden Strahlengänge vereinigt.

D.3. Fehlfarbenbestimmung

In der vorliegenden Arbeit bediente ich mich folgender Methode zur Fehlfarbenbestimmung:
Der Versuchsperson wurden nacheinander verschiedene Farbreize in der linken Gesichtsfeldhälfte des Dreifarbenmeßgerätes dargeboten (Abb. 2). Diese Reize wurden durch Überlagerung des durch zwei Farbfilter, OG 530 (gelb) und BG 24 (blau), hindurchtretenden Lichts erzeugt. Graufilter dienten zusätzlich zur nichtselektiven Lichtabschwächung. Dabei befanden sich das Gelbfilter und die Graufilter zwischen Linse L_3 und Umlenkprisma U_2, während das Blaufilter im Probenstrahlengang P zwischen Linse L_1 und Umlenkprisma U_3 plaziert wurde.
So entstanden 12 Ausgangsreize. Die Messungen fanden bei Tageslicht statt. Es wurde darauf geachtet, daß die Versuchspersonen jeweils nur mit ein und demselben Auge getestet wurde. Die Dauer einer Sitzung wurde auf maximal zwei Stunden festgelegt. Um eine Überanstrengung der Versuchsperson zu vermeiden, wurden kleinere Pausen eingelegt.
Nach vorheriger Unterweisung in der Bedienung des Gerätes konnten die Versuchspersonen nach einiger Übung die links vorgegebenen Farbreize auf der rechten Hälfte mit Hilfe der drei Primärvalenzen $\vec{D}$, $\vec{E}$, $\vec{F}$ reproduzierbar einstellen.
Es ergab sich folgende Farbgleichung

$$\vec{C} = D_o \vec{D} + E_o \vec{E} + F_o \vec{F} \quad ,$$

wo $\vec{D}$, $\vec{E}$, $\vec{F}$ die "blaue", "grüne" und "rote" instrumentelle Primärvalenz und D_o, E_o, F_o die am Gerät eingestellten Farbwerte für die Ausgangsreize sind.

Von den Ausgangsreizen ausgehend — ihre Farbörter sind in den Abbildungen 4 bis 7 als offene Kreise eingetragen —, wurde nun vom Versuchsleiter die grüne Mischungskomponente geändert, so daß auf der rechten Gesichtsfeldhälfte ein Farbreiz erschien, der sich deutlich überschwellig vom Ausgangsreiz unterschied.

Nun wurde die Versuchsperson aufgefordert, durch Variieren der blauen und roten Mischungskomponente allein beide Photometerhälften zunächst heterochrom — mit deutlich unterschiedlicher Farbe — auf gleiche Helligkeit einzustellen. Dabei stellte es sich heraus, daß ein alleiniges Variieren der roten Komponente ausreichte.

Den vier Deuteranomalen wurde nun eine Beobachtungszeit von 15 Sekunden zur Adaptation zugebilligt (19). Für Dichromaten reichen im allgemeinen 3 Sekunden Adaptationszeit aus. Es kam nun darauf an, zumindest einmal innerhalb der 15 Sekunden eine Farbumstimmung zu erreichen, d.h. ein momentanes Gleich der beiden Gesichtsfeldhälften zu erzielen. Wurde dieses Kriterium erfüllt, so wurde der Farbabgleich als gültig anerkannt. Für den Deuteranomalen gilt für diesen Fall der Gleichheit:

$$\vec{C}_o = \vec{C}_1$$

$$D_o \vec{D} + E_o \vec{E} + F_o \vec{F} = D_1 \vec{D} + E_1 \vec{E} + F_1 \vec{F} .$$

Das Gleichheitszeichen steht in diesem Falle für die Äquivalenz des gleichen Aussehens. Dieses Verfahren wurde beliebig oft fortgesetzt, bis der Adaptationstest negativ verlief.

Um von den Eigenschaften des Dreifarbenmeßgerätes unabhängig zu sein, erfolgte die Normierung (Abschn. B.2.). Die Festlegung der Primärvalenzen in ihren Intensitätsverhältnissen zueinander wurde für die rote und grüne Primärvalenz bei der Wellenlänge 583 nm und für die grüne und blaue Primärvalenz bei der Wellenlänge 494 nm vorgenommen. Die Normierung wurde bei 583 nm für den "roten" Farbwert F gemäß $\frac{R(583)}{G(583)} = 0{,}4$ und bei 494 nm für den "blauen" Farbwert D gemäß $\frac{B(494)}{G(494)} = 1$ festgelegt.

Der erste Farbabgleich (Rayleigh-Gleichung) wurde immer von einer normalsichtigen Person vorgenommen, die somit als Bezugsbeobachter für den Wellenlängenbereich $\geq$ 530 nm diente. Der zweite normierende Farbabgleich (Trendelenburg-Gleichung) wurde individuell von der jeweiligen Versuchsperson eingestellt. Durch letztere Normierung wird der Einfluß der gelben Maculapigmentierung, die besonders unterhalb von 530 nm Licht absorbiert, in erster Näherung ausgeschaltet.

Rechnet man die Farbwerte der obigen Äquivalenzgleichung nach der gerade beschriebenen Normierung um, so erhält man

$$B_o \cdot \vec{B} + G_o \cdot \vec{G} + R_o \cdot \vec{R} = B_1 \cdot \vec{B} + G_1 \cdot \vec{G} + R_1 \cdot \vec{R}$$

und, allgemein ausgedrückt, für beliebig viele Farbabgleiche

$$B_o \cdot \vec{B} + G_o \cdot \vec{G} + R_o \cdot \vec{R} = B_i \cdot \vec{B} + G_i \cdot \vec{G} + R_i \cdot \vec{R}, \quad i = 1, 2 \ldots n.$$

Es wurden nun die Differenzen $B_o - B_i$, $G_o - G_i$ und $R_o - R_i$ gebildet. Diese Farbwertdifferenzen führen zu folgender Form eines Differenzvektors

$$\vec{\Delta} = (B_o - B_i)\vec{B} + (G_o - G_i)\vec{G} + (R_o - R_i)\vec{R}, \quad i = 1, 2 \ldots n.$$

Die verschiedenen parallel zueinander verlaufenden Differenzvektoren treffen sich durch Projektion vom Nullpunkt aus in einem Punkt der Farbtafel, dem "Fehlpunkt". In der Farbtafel erscheinen die Differenzvektoren als Stücke von Verwechslungsgeraden, die die Form eines Geradenbüschels haben (91).

Im einfachsten Fall läßt sich also die Fehlfarbe eines Farbenfehlsichtigen aus zwei geeigneten Farben ermitteln, die für ihn ununterscheidbar sind (56, 57). Für die Darstellung der Farbvalenzen in der Farbtafel müssen die Farbwertanteile der jeweiligen Farbwerte berechnet werden. Aus den Farbwerten B, G, R wird die Summe gebildet, und jeder Farbwert durch diese Summe geteilt; wir erhalten Größen, die "Farbwertanteile" b, g, r heißen:

$$b = \frac{B}{B+G+R} \; ; \qquad g = \frac{G}{B+G+R} \; ; \qquad r = \frac{R}{B+G+R} \; .$$

Für die graphische Darstellung wird r auf der Abszisse und g auf der Ordinate aufgetragen. Die Primärvalenzen $\vec{B}$, $\vec{G}$, $\vec{R}$ liegen auf den Ecken eines gleichschenkligen Dreiecks.
Die Darstellung der eben erwähnten Farbtafel kann in der Einheitsebene B + G + R = 1 (68) erfolgen, vgl. Abb. 1. Die Farbwertanteile beschreiben die "Farbart" oder auch den "Farbort".

Die Farbörter der jeweiligen Farbreize sind in den Abbildungen 4 bis 7 als volle Kreise gezeichnet. Zu jedem Differenzvektor $\vec{\Delta}$, d.h. zu jeder Fehlfarbe, konnte der zugehörige Fehlpunkt eingezeichnet werden.

Es bot sich an, eine mittlere Fehlfarbe zu berechnen.

Zum Zwecke einer reinen Richtungsmittelung konnte zu inhomogenen projektiven Koordinaten übergegangen werden (94):

$$\frac{B_o - B_i}{G_o - G_i}, \qquad \frac{G_o - G_i}{G_o - G_i} \equiv 1; \qquad \frac{R_o - R_i}{G_o - G_i}, \qquad i = 1, 2 \ldots n$$

Aus diesen Quotienten wurde das arithmetische Mittel gebildet. Nach Übergang zu den Farbwerten lieferte das sowohl eine mittlere Fehlfarbe zu allen Ausgangsreizen als auch eine mittlere Fehlfarbe für jede Verwechslungsgerade:

$$\text{mittlere Fehlfarbe } \vec{f} = B_m \cdot \vec{B} + G_m \cdot \vec{G} + R_m \cdot \vec{R}, \text{ mit } G_m = 1.$$

Es ergaben sich für jede Versuchsperson verschieden viele einzelne Fehlpunkte, je nach der Menge der bestimmten Fehlfarben und der individuellen Umstimmbarkeit.

D.4. Bestimmung der Alychne

Im Anschluß an die Bestimmung der Fehlfarbe erfolgte die Ermittlung der Alychne, die nur mit Hilfe heterochromer Helligkeitsabgleiche zu erreichen ist.

Das experimentelle Vorgehen war folgendermaßen. Zur Erzeugung des Ausgangsfarbreizes in der linken Gesichtsfeldhälfte (Abb. 2) dienten verschiedene Farbfilter wie die schon bekannten Filter OG 530 (gelb), BG 24 (blau), einzelne rote und

braun-orange Filter sowie diverse Graufilter. Dabei befanden sich die Filter im Entsättigungsstrahlengang zwischen Umlenkprisma U_2 und Linse L_3 (Abb. 3). Der Probenstrahlengang war bei dieser Anordnung abgedunkelt. Dem Verfahren aus Abschnitt B.5. folgend, ließen sich mit Hilfe der Brodhunschen Sektorenvorrichtung beliebige, heterochrome Abgleiche erzielen. Es ergaben sich 10 bis 15 verschiedene Quervektoren je nach Versuchsperson, aus denen sich dann nach dem Verfahren der Schlußlinie (29) ein mittlerer Quervektor bestimmen ließ.

D.5. Bestimmung der Spektralwertkurven

Für die Spektralfarbenbestimmung wurden der Versuchsperson Farbreize aus einem Gittermonochromator (Hersteller: Bausch und Lomb) vorgegeben. Der Probenstrahlengang wurde bei dieser Anordnung zur Entsättigung der einzelnen Spektralreize benutzt, wobei neben dem entsprechenden roten, grünen oder blauen Entsättigungsfilter zur kontinuierlichen Abschwächung ein Graukeil in den Strahlengang gebracht wurde. Diese "negative" Mischungskomponente war fast über der gesamten Wellenlängenachse notwendig. Die Entsättigungsstrahlung wurde der Reizstrahlung mit Hilfe des Mischwürfels M überlagert. Die Brodhun-Sektorenmeßvorrichtung (BSM) erlaubte eine lineare nicht selektive Abschwächung des Strahlengangs der linken Gesichtsfeldhälfte. Der Gittermonochromator gestattete ein Vorgehen in 5 nm-Schritten. Gemessen wurde zwischen den Wellenlängen 420 nm und 700 nm. Für jede Versuchsperson ergaben sich so aus 5 bis 8 Durchgängen mittlere Spektralwertkurven, die in den Abbildungen 10 bis 13 gezeigt sind.

D.6. Bestimmung der Transformationsgleichungen

Eine Transformation von einem Farbenraum ($\vec{R}$, $\vec{G}$, $\vec{B}$) zu einem Farbenraum ($\vec{X}$, $\vec{Y}$, $\vec{Z}$) läßt sich mit Hilfe von drei Farbarten und einer frei wählbaren Farbvalenz (hier: Filter VG 12) aufstellen (15). Aus Tabellen für Normspektralwerte kann man die relativen Farbwerte für die drei instrumentellen Primärvalenzen entnehmen (117). Dabei habe ich für die grüne Primärvalenz nicht 530 nm, sondern 531 nm genommen.

Es ergaben sich folgende Gleichungen mit k, l, m als Proportionalitätsfaktoren:

$$\begin{aligned}
\vec{B}(460) &= k \cdot 0{,}2908\ \vec{X} + k \cdot 0{,}06\ \vec{Y} + k \cdot 1{,}6692\ \vec{Z} \\
\vec{G}(531) &= l \cdot 0{,}177257\ \vec{X} + l \cdot 0{,}8738108\ \vec{Y} + l \cdot 0{,}03950728\ \vec{Z} \qquad (1) \\
\vec{R}(650) &= m \cdot 0{,}2835\ \vec{X} + m \cdot 0{,}107\ \vec{Y} + 0
\end{aligned}$$

Nach den in Abschnitt B.3. angegebenen Matrizenregeln führt die Transposition des Koeffizientenschemas und der Übergang zu Farbwerten zu:

$$\begin{aligned}
X &= k \cdot 0{,}2908\ B + l \cdot 0{,}177257\ G + m \cdot 0{,}2835\ R \\
Y &= k \cdot 0{,}06\ B + l \cdot 0{,}8738108\ G + m \cdot 0{,}107\ R \qquad (2) \\
Z &= k \cdot 1{,}6692\ B + l \cdot 0{,}03950728\ G + 0
\end{aligned}$$

Die Bestimmung der drei Konstanten k, l, m erfolgte mit den Normfarbwerten von Filter VG 12 (Hersteller: Jenaer Glaswerk Schott & Gen., Mainz). Sie lagen als Ergebnis früherer Messungen vor und lauten (84):

$$(X, Y = A, Z) = (13{,}358;\ 22{,}836;\ 16{,}052), \qquad (3)$$

wo A den sog. Hellbezugswert darstellt.

Dasselbe Filter wurde von einer normalsichtigen Person am Dreifarbenmeßgerät abgeglichen:

$$(D,E,F) = (56{,}2;\ 72{,}9;\ 16{,}2) \tag{4}$$

Nach Umrechnung in das (B,G,R)-System:

$$(B,G,R) = (39{,}34;\ 72{,}9;\ 5{,}55). \tag{5}$$

Zusätzlich wurde bei entferntem Okular die Leuchtdichte des abgeglichenen Photometerfeldes mit einem visuellen Leuchtdichtemesser nach Bechstein gemessen:

$$L = 90{,}327\ \mathrm{cd/m^2} \tag{6}$$

Die Normfarbwerte des Filters VG 12 wurden auf diesen Wert normiert

$$(X,Y,Z) = (52{,}8376;\ 90{,}327;\ 63{,}4937) \tag{7}$$

Durch Einsetzen von (5) und (7) in das Gleichungssystem (2) erhält man:

$$\begin{aligned} 52{,}8376 &= k\cdot 0{,}2908\cdot 39{,}34 + l\cdot 0{,}177257\cdot 72{,}9 + m\cdot 0{,}2835\cdot 5{,}55 \\ 90{,}327 &= k\cdot 0{,}06\cdot 39{,}34 + l\cdot 0{,}8738108\cdot 72{,}9 + m\cdot 0{,}107\cdot 5{,}55 \\ 63{,}4937 &= k\cdot 1{,}6692\cdot 39{,}34 + l\cdot 0{,}03950728\cdot 72{,}9 + 0 \end{aligned} \tag{8}$$

Die Auflösung dieses Gleichungssystems ergibt:

$$k = 0{,}9131\ ;\quad l = 1{,}2269\ ;\quad m = 16{,}866 \tag{9}$$

Daraus folgte durch Einsetzen in (2):

$$\begin{aligned} X &= 0{,}2655\ B + 0{,}2175\ G + 4{,}7815\ R \\ Y &= 0{,}05479\ B + 1{,}0721\ G + 1{,}8047\ R \\ Z &= 1{,}5242\ B + 0{,}04847\ G + 0 \end{aligned} \tag{10}$$

Die zu (10) kontragrediente Matrix erlaubt die Transformation der Primärvalenzen $\vec{B}$, $\vec{G}$, $\vec{R}$ und der Leuchtdichtebeiwerte ß, γ, ϱ ins CIE-System:

$$\begin{aligned}
\vec{X} &= 0{,}01211 \cdot \vec{B} - 0{,}3807 \cdot \vec{G} + 0{,}2258 \cdot \vec{R} \\
\vec{Y} &= -0{,}03208 \cdot \vec{B} + 1{,}009 \cdot \vec{G} + 0{,}04409 \cdot \vec{R} \qquad (11) \\
\vec{Z} &= 0{,}6551 \cdot \vec{B} + 0{,}03006 \cdot \vec{G} - 0{,}03775 \cdot \vec{R}
\end{aligned}$$

Während der Durchführung der Versuche mußte die Wolfram-Halogen-Glühlampe ausgetauscht werden. Deshalb war eine erneute Kalibrierung des Dreifarbenmeßgerätes notwendig, auf deren ausführliche Darstellung ich hier jedoch verzichten möchte, da sie prinzipiell genauso erfolgte, wie soeben erläutert.

E. Ergebnisse

E.1. Darstellung der Fehlfarben

Die Abbildungen 4 bis 7 zeigen die Ergebnisse der Fehlfarbenbestimmung für die vier untersuchten Deuteranomalen. Bei der Darstellung in der (g,r)-Farbtafel ist das (B,G,R)-System von Wright benutzt in der Normierung B(494)/G(494) = 1 und R(583)/G(583) = 0,4. Die Eckpunkte des gleichschenkligen Dreiecks entsprechen den Farbörtern der drei Primärvalenzen $\vec{B}(460)$, $\vec{G}(530)$ und $\vec{R}(650)$.

Die Farbörter der Ausgangsreize sind als offene Kreise eingezeichnet und von Gelb nach Blau mit 1 bis 12 numeriert. Die zu den Ausgangsreizen ununterscheidbaren Farbvalenzen sind als schwarze Punkte zu sehen und durch Ziffern der Reihe nach gekennzeichnet. Die jeweilige Verwechslungsgerade, bestehend aus 2 bis 10 Meßpunkten, ist eingezeichnet. Jedem Meßpunkt der 12 Verwechslungsgeraden entspricht ein Fehlpunkt auf der linken Hälfte jeder Abbildung. Dabei gelten die gleichen Bezeichnungen, die bezifferten schwarzen Punkte stehen für die einzelnen Differenzvektoren einer jeden Verwechslungsgeraden. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die verschiedenen Fehlpunkte, die zu jeder isochromatischen Linie gehören, parallel verschoben zur rot-grünen Dreiecksseite eingezeichnet, so daß nur noch die Abszissenwerte gelten.

Nach dem in Abschnitt D.3. dargelegten Verfahren wurde für jede Versuchsperson eine mittlere Fehlfarbe bestimmt. Tabelle 1 zeigt die Farbwerte des mittleren Fehlfarbenvektors $\vec{f}$ jeder

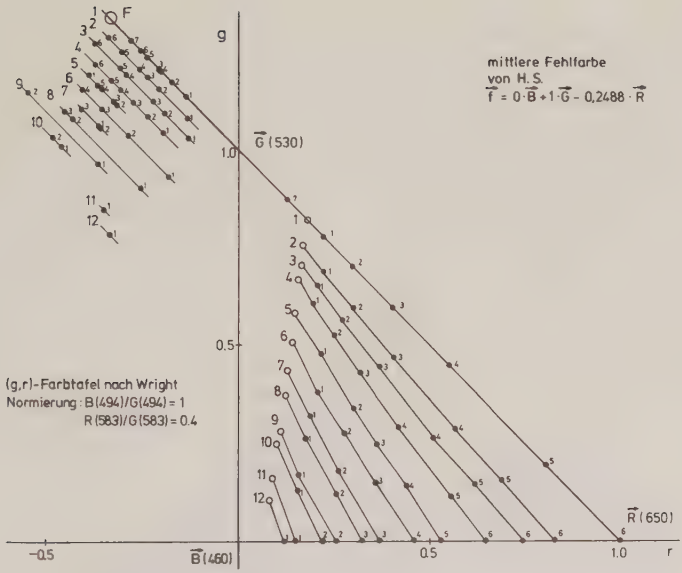


Abb. 4: Fehlfarbenbestimmung für die Versuchsperson H.S.. Die Ausgangsreize sind als offene Kreise eingezeichnet. Die numerierten Meßpunkte jeder Verwechslungsgeraden entsprechen den eingezeichneten Fehlpunkten der linken Bildhälfte. Außer den Fehlpunkten für die erste Verwechslungsgerade sind alle anderen Meßpunkte jeweils im gleichen Abstand parallel verschoben gekennzeichnet. Dabei gilt nur noch der Abszissenwert r (ordinaler Homomorphismus). Der mittlere Fehlpunkt F der Versuchsperson H.S. ist bei den Koordinaten g = 1,3312 und r = - 0,3312 eingezeichnet als großer Kreis. Die Normierung entspricht der Abbildung 1.

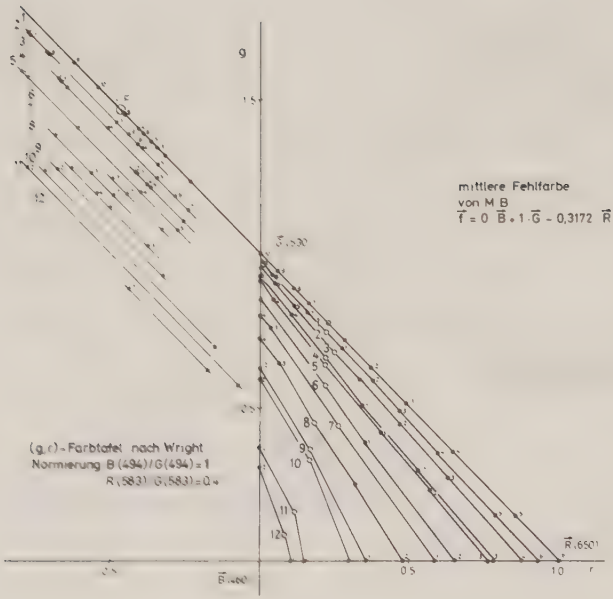


Abb. 5: Fehlfarbenbestimmung für die Versuchsperson M.B.. Die Erläuterungen von Abbildung 4 gelten auch hier. Der eingezeichnete mittlere Fehlpunkt F der Versuchsperson M.B. liegt bei den Koordinaten g = 1,4645 und r = - 0,4645.

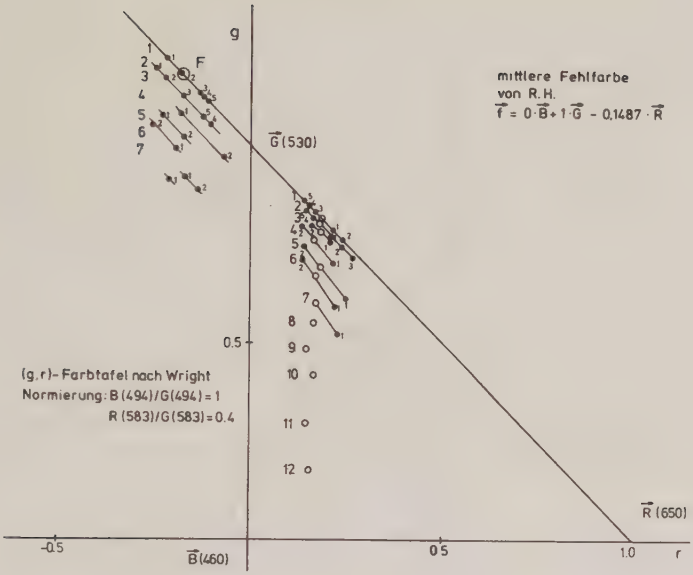


Abb. 6: Fehlfarbenbestimmung für die Versuchsperson R.H..
Die Erläuterungen von Abbildung 4 gelten auch hier.
Der eingezeichnete mittlere Fehlpunkt F der Versuchsperson R.H. liegt bei den Koordinaten g = 1,1747 und r = - 1,1747.

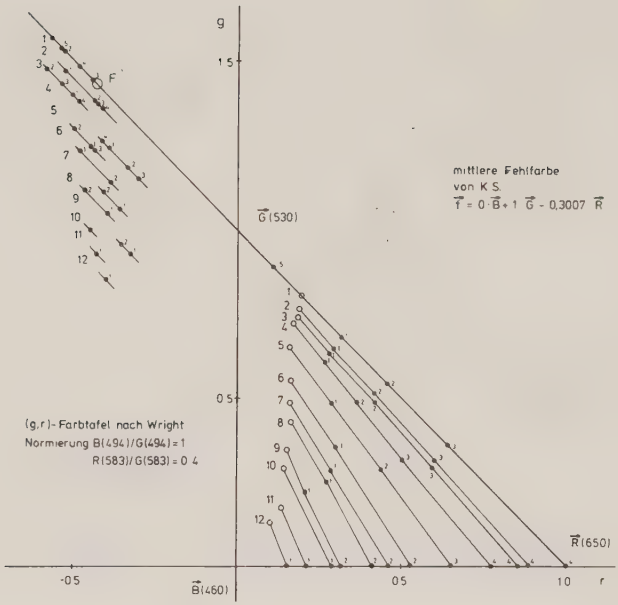


Abb. 7: Fehlfarbenbestimmung für die Versuchsperson K.S. (Bruder der Versuchsperson H.S.). Die Erläuterungen von Abbildung 4 gelten auch hier. Der eingezeichnete mittlere Fehlpunkt F der Versuchsperson K.S. liegt bei den Koordinaten g = 1,4299 und r = - 0,4299

Tabelle 1: mittlere Fehlfarben

H.S.: $\vec{f} = 0\,\vec{B} + 1\,\vec{G} - 0{,}2488\,\vec{R}$

M.B.: $\vec{f} = 0\,\vec{B} + 1\,\vec{G} - 0{,}3172\,\vec{R}$

R.H.: $\vec{f} = 0\,\vec{B} + 1\,\vec{G} - 0{,}1487\,\vec{R}$

K.S.: $\vec{f} = 0\,\vec{B} + 1\,\vec{G} - 0{,}3007\,\vec{R}$

Tabelle 2a: Fehlfarbwertanteil r (Versuchsperson H.S.)

1.1.	-0,1341	2.1.	-0,1275	3.1.	-0,1250
1.2.	-0,1768	2.2.	-0,2011	3.2.	-0,1875
1.3.	-0,2058	2.3.	-0,2353	3.3.	-0,2185
1.4.	-0,2055	2.4.	-0,2500	3.4.	-0,2871
1.5.	-0,2294	2.5.	-0,2953	3.5.	-0,3018
1.6.	-0,2454	2.6.	-0,3342	3.6.	-0,3687
1.7.	-0,2738				
4.1.	-0,1905	5.1.	-0,3846	6.1.	-0,1772
4.2.	-0,2362	5.2.	-0,3103	6.2.	-0,2833
4.3.	-0,2695	5.3.	-0,3187	6.3.	-0,3497
4.4.	-0,2997	5.4.	-0,3488	6.4.	-0,4046
4.5.	-0,3257	5.5.	-0,3600		
4.6.	-0,3658				
7.1.	-0,3590	8.1.	-0,2500	9.1.	-0,3600
7.2.	-0,3553	8.2.	-0,4286	9.2.	-0,5417
7.3.	-0,4037	8.3.	-0,4474		
10.1.	-0,4545	11.1.	-0,3461	12.1.	-0,3333
10.2.	-0,4762				

Tabelle 2b: Fehlfarbwertanteil r (Versuchsperson M.B.)

1.1.	-0,2338	2.1.	-0,7105	3.1.	-0,6458
1.2.	-0,3176	2.2.	-0,7742	3.2.	-0,6729
1.3.	-0,3657	2.3.	-0,4804	3.3.	-0,6707
1.4.	-0,4057	2.4.	-0,3931	3.4.	-0,5099
1.5.	-0,3451	2.5.	-0,3401	3.5.	-0,3476
1.6.	-0,3903	2.6.	-0,4071	3.6.	-0,2875
1.7.	-0,4583	2.7.	-0,7708	3.7.	-0,2410
1.8.	-0,4539	2.8.	-0,7066		
1.9.	-0,6223	2.9.	-0,4392		
1.10.	-0,5424				
4.1.	-0,2571	5.1.	-0,7761	6.1.	-0,3281
4.2.	-0,4146	5.2.	-0,7963	6.2.	-0,4453
4.3.	-0,4128	5.3.	-0,6108	6.3.	-0,4931
4.4.	-0,3770	5.4.	-0,4000		
4.5.	-0,3660	5.5.	-0,2789		
7.1.	-0,6833	8.1.	-0,6296	9.1.	-0,3250
7.2.	-0,4900	8.2.	-0,5000	9.2.	-0,6757
7.3.	-0,5648	8.3.	-0,3750		
		8.4.	-0,5484		
10.1.	-0,1538	11.1.	-0,0714	12.1.	-0,1667
10.2.	-0,7188	11.2.	-0,7857	12.2.	-0,4375

Tabelle 2c: Fehlfarbwertanteil r (Versuchsperson R.H.)

1.1.	-0,2174	2.1.	-0,2444	3.1.	-0,1778
1.2.	-0,1778	2.2.	-0,2184	3.2.	-0,0682
1.3.	-0,1282	2.3.	-0,1729		
1.4.	-0,1190	2.4.	-0,1000		
1.5.	-0,0992	2.5.	-0,1190		
4.1.	-0,2250	5.1.	-0,1905	6.1.	-0,1667
4.2.	-0,1714	5.2.	-0,2500	6.2.	-0,1364
7.1.	-0,2105				

Tabelle 2d: Fehlfarbwertanteil r (Versuchsperson K.S.)

1.1.	-0,5690	2.1.	-0,5238	3.1.	-0,5000
1.2.	-0,5268	2.2.	-0,4308	3.2.	-0,5795
1.3.	-0,4425	2.3.	-0,4227	3.3.	-0,5368
1.4.	-0,4826	2.4.	-0,4131	3.4.	-0,4840
1.5.	-0,5345				
4.1.	-0,3889	5.1.	-0,4426	6.1.	-0,4792
4.2.	-0,3333	5.2.	-0,4906	6.2.	-0,3853
4.3.	-0,3000	5.3.	-0,4340		
4.4.	-0,4113				
7.1.	-0,3571	8.1.	-0,4643	9.1.	-0,3529
7.2.	-0,4079	8.2.	-0,3966	9.2.	-0,3250
10.1.	-0,4483	11.1.	-0,4286	12.1.	-0,4000

Die Tabellen 2a bis 2d zeigen die Farbörter sämtlicher Fehlpunkte, d.h. die Farbwertanteile. Da zur Orientierung in den Abbildungen 4 bis 7 der Farbwertanteil r maßgebend ist, soll hier auf die ausführliche Darstellung von g verzichtet werden. Weil der blaue Farbwert B in keinem Fall variiert zu werden brauchte, und somit auch der Fehlfarbwertanteil $b = 0$ war, ergibt sich g leicht aus folgender Gleichung: $g = 1 - r$.

Tabelle 3 zeigt die mittleren Fehlfarbwertanteile g und r; Sie sind als großer Kreis in die Abb. 4 bis 7 eingezeichnet.

E.2. Darstellung im CIE-System von 1931

Eine Transformation der Ergebnisse aus dem (B,G,R)-System von Wright in das internationale CIE-System von 1931, gemäß den Regeln aus Abschnitt D.6., bietet die Möglichkeit, die Ergebnisse anderer Autoren zum Vergleich heranzuziehen. Abbildung 8 zeigt die Lage der Fehlpunkte in der (x,y)-Farbtafel. Die numerischen Daten gibt Tabelle 4 wieder.
Über die Problematik der Transformation der anomalen Trichromasie wird in der Diskussion ausführlich eingegangen.

E.3. Alychne, Alychnenspur und Leuchtdichtebeiwerte

Nach dem Verfahren aus Abschnitt D.4. wurden von den Versuchspersonen 6 bis 15 Quervektoren mit Hilfe von heterochromen Helligkeitsabgleichen bestimmt. Nach dem Verfahren der Schlußlinie ergab sich ein mittlerer Quervektor $\vec{q}$ für jede Versuchs-

person (Abschnitt B.5.).

Der Farbort des mittleren Quervektors $\vec{q}$ ist zusammen mit dem der mittleren Fehlfarbe $\vec{f}$ (Tab. 3) ausschlaggebend für den Verlauf der Schnittspur der Alychne mit der Farbtafel. Aus Tabelle 5 kann man die Ergebnisse für den Farbort des mittleren Quervektors sowie die Gleichung der Alychnenspur entnehmen. Abbildung 9 zeigt den Verlauf der Alychnenspur aller vier Deuteranomalen in der (g,r)-Farbtafel.

Für die Versuchsperson H.S. ist die mittlere Fehlfarbe (●) und der mittlere Quervektor (o) mit der Ziffer 1 versehen, für die Versuchsperson M.B. gilt entsprechend die Ziffer 2, für R.H. die Ziffer 3 und für K.S. die Ziffer 4.

Tabelle 6 schließlich erläutert die Ergebnisse für die Leuchtdichtebeiwerte β, γ und ϱ, die nach dem Verfahren aus Abschnitt B.5. bestimmt wurden. Die Leuchtdichtebeiwerte sind insbesondere für die Aufstellung einer Hellempfindlichkeitsfunktion, die in Abschnitt E.6. durchgeführt wird, von besonderer Wichtigkeit.

E.4. Spektralwertkuven

Für jede Versuchsperson wurden in fünf bis acht Durchgängen Spektralwertkurven aufgestellt. Die Abbildungen 10 bis 13 zeigen die über der Wellenlänge aufgetragenen mittleren Spektralwertkurven $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{r}(\lambda)$. Alle Werte sind für $\bar{g}(\lambda)$ bei 550 nm auf den Wert 1 normiert. Im Vergleich zu den Kurven der jeweiligen Versuchsperson sind in Form der durchgezogenen Linien die Spektralwertkurven des farbmeßtechnischen Normalbeobachters CIE 1931 in der von Judd (38) modifizierten Form eingezeichnet.

Tabelle 3: mittlere Fehlfarbwertanteile g, r

H. S.:	g = 1,3312	r = -0,3312
M B.:	g = 1,4645	r = -0,4645
R. H.:	g = 1,1747	r = -0,1747
K. S.:	g = 1,4299	r = -0,4299

Tabelle 4: mittlere Fehlfarbwertanteile x, y im CIE-System

H. S.:	x = 3,2342	y = -2,0729
M. B.:	x = 1,7300	y = -0,6654
R. H.:	x = -0,8979	y = 1,7935
K. S.:	x = 2,4843	y = -1,3712

Tabelle 5: mittlere Farbwertanteile des Querpunktes

H. S.: $g = -0{,}1915$ $r = 0{,}0273$

M. B.: $g = -0{,}2058$ $r = 0{,}0364$

R. H.: $g = -0{,}2114$ $r = 0{,}0129$

K. S.: $g = -0{,}2950$ $r = 0{,}0797$

Schnittspur der Alychne mit der Farbtafel

H. S.: $g = -4{,}2430 \cdot r - 0{,}0741$

M. B.: $g = -3{,}3336 \cdot r - 0{,}0841$

R. H.: $g = -7{,}3865 \cdot r - 0{,}1156$

K. S.: $g = -3{,}5700 \cdot r - 0{,}1051$

Tabelle 6: Abneysche Gleichung für die Leuchtdichte L
gemäß $L = \beta \cdot B + \gamma \cdot G + \varrho \cdot R$
Normierung: $B(494)/G(494) = 1$
$R(583)/G(583) = 0{,}4$

H. S.: $L = 0{,}0690\ B + 1\ G + 4{,}0193\ R$

M. B.: $L = 0{,}0776\ B + 1\ G + 3{,}1526\ R$

R. H.: $L = 0{,}1036\ B + 1\ G + 6{,}7249\ R$

K. S.: $L = 0{,}0951\ B + 1\ G + 3{,}3256\ R$

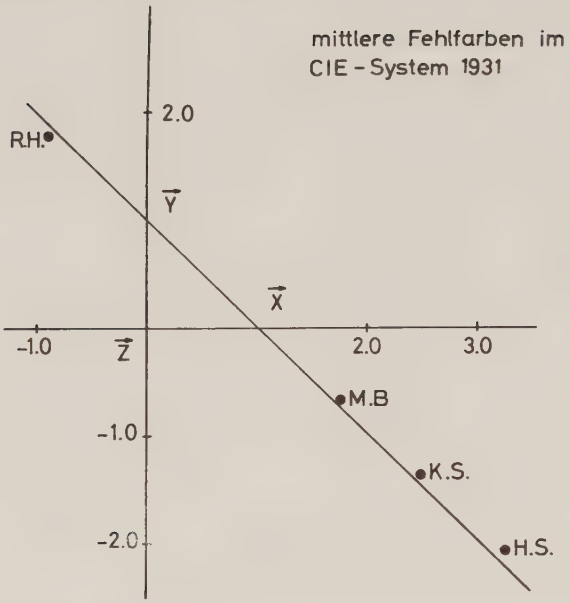


Abb. 8: Darstellung der Fehlpunktslage im CIE-System ($\vec{X}$, $\vec{Y}$, $\vec{Z}$)

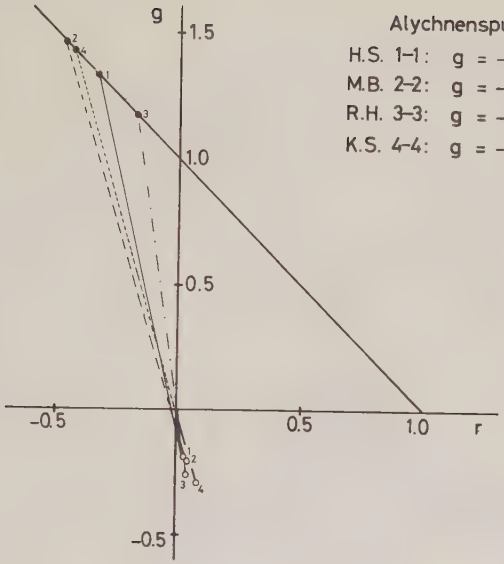


Abb. 9: Darstellung der durch Fehlpunkt und Querpunkt bestimmten Alychnenspur in der (g,r)-Farbtafel nach Wright. Die Lage der mittleren Fehlpunkte der vier Versuchspersonen (● 1 bis 4) ist aus den Abbildungen 4 bis 7 und/oder der Tabelle 3 entnommen. Die Farbwertanteile der mittleren Querpunkte (o 1 bis 4) sind der Tabelle 5 entnommen.

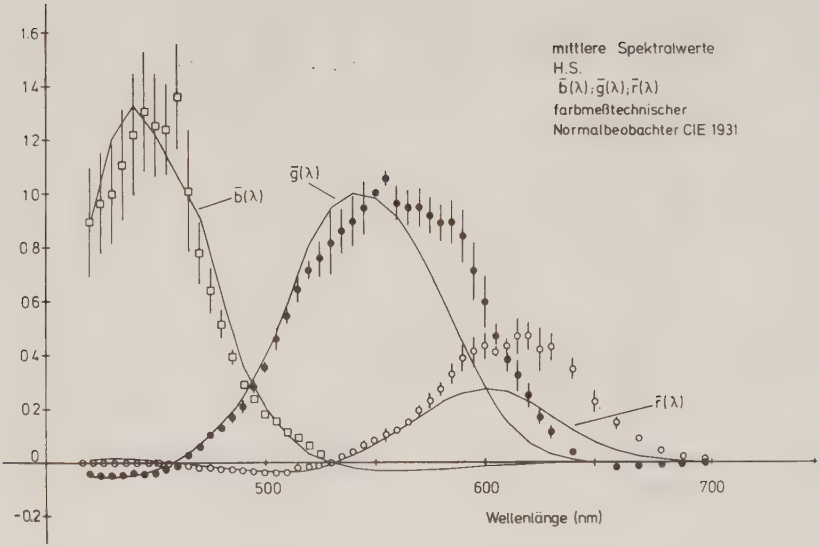


Abb. 10: Über der Wellenlänge sind die mittleren Spektralwertkurven $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{r}(\lambda)$ der Versuchsperson H.S. aufgetragen. Im Vergleich dazu sind die Spektralwertkurven des farbmeßtechnischen Normalbeobachters CIE 1931 in der von Judd modifizierten Form (38) als durchgezogene Linie eingezeichnet.

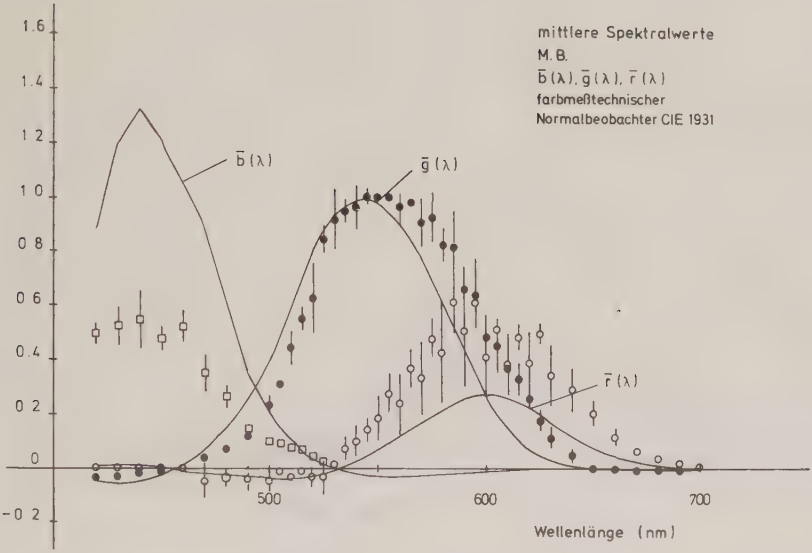


Abb. 11: Spektralwertkurven der Versuchsperson M.B.. Weitere Erläuterungen in Abb. 10.

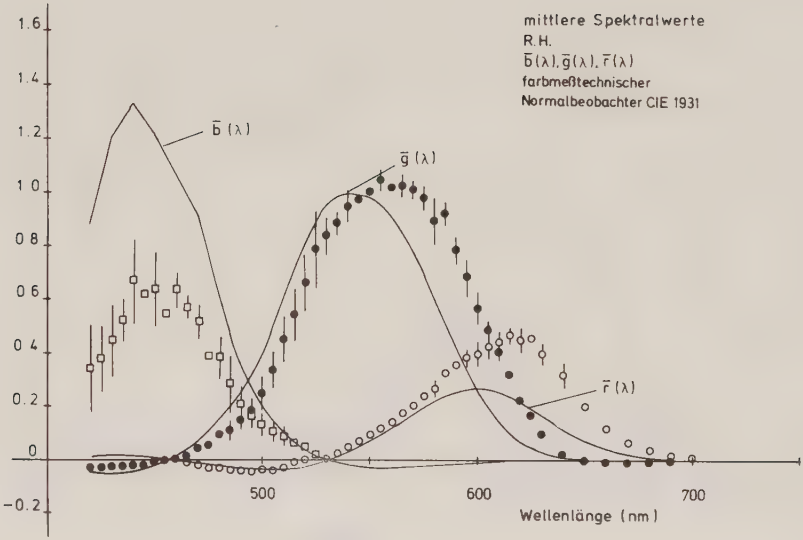


Abb. 12: Spektralwertkurven der Versuchsperson R.H.. Weitere Erläuterungen in Abb. 10.

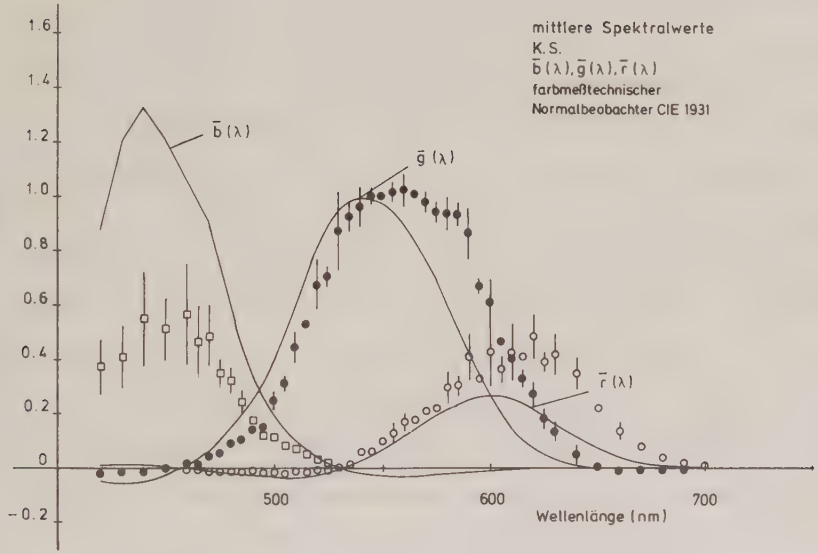


Abb. 13: Spektralwertkurven der Versuchsperson K.S. (Bruder der Versuchsperson H.S.). Weitere Erläuterungen in Abb. 10.

Die Ergebnisse können wie folgt beschrieben werden:
Die mittleren Kurven $\bar{g}(\lambda)$ sind bei allen Versuchspersonen, wie bei Deuteranomalen zu erwarten, deutlich nach längeren Wellenlängen verschoben. Für H.S. beträgt die Verschiebung 11 nm, für M.B. lediglich 3 nm, bei R.H. sind es 17 nm und schließlich bei K.S. 16 nm, jeweils zum langwelligen Spektrumsende.
Die langwellige Spektralwertkurve $\bar{r}(\lambda)$ zeigt bei der Versuchsperson H.S. eine Abweichung von 17 nm zu längeren Wellenlängen, die sich in ähnlicher Form auch bei R.H. (18 nm) und K.S. (14 nm) wieder findet. Bei der Versuchsperson M.B. zeigt sich jedoch eine entgegengesetzte Verschiebung zu kürzeren Wellenlängen von 8 nm.

Die Tabelle 7 zeigt die Verschiebung der $\bar{g}(\lambda)$- bzw. $\bar{r}(\lambda)$-Kurve jeweils bezogen auf den Normalbeobachter CIE 1931.

Tabelle 7: Verschiebung der $\bar{g}(\lambda)$-Kurve und der $\bar{r}(\lambda)$-Kurve bezogen auf die Kurven des Normalbeobachters CIE 1931

\+ : Verschiebung zu längeren Wellenlängen
\- : Verschiebung zu kürzeren Wellenlängen

	$\bar{g}(\lambda)$-Kurve	$\bar{r}(\lambda)$-Kurve
H. S.:	+ 11 nm	+ 17 nm
M. B.:	+ 3 nm	- 8 nm
R. H.:	+ 17 nm	+ 18 nm
K. S.:	+ 16 nm	+ 14 nm

E.5. Abbildung auf einen deuteranopischen Farbenraum (K, W)

Mit Hilfe der Fehlfarbe ist ein Übergang vom trichromatischen Farbenraum zum zweidimensionalen dichromatischen möglich. Der Abschnitt B.4. beschreibt eine solche Reduktion. Im Falle der Deuteranomalie beschreiben die Reduktionsgleichungen aus Abschnitt B.4. den Übergang von einem eigenständigen anomalen trichromatischen Farbenraum auf den zweidimensionalen deuteranopischen Farbenraum, unter der Vorraussetzung, daß der Deuteranop eine Reduktionsform des Deuteranomalen ist (94). Die dichromatischen (deuteranopischen) Farbwerte K und W gestatten eine gewisse Aussage über die noch verbliebenen Mechanismen des Deuteranomalen. Tabelle 8 zeigt die Abbildungsgleichungen für die vier Versuchspersonen. Sie zeigen, daß der Farbwert K identisch mit B und der Farbwert W eine Linearkombination von G und R ist. Wendet man die Reduktionsgleichungen auf die in Abbildung 10 bis 13 gezeigten Spektralwertkurven an, so entspricht folglich $\bar{b}(\lambda)$ einer $\bar{k}(\lambda)$-Kurve und $\bar{g}(\lambda)$ vereinigt sich in unterschiedlichem Verhältnis mit $\bar{r}(\lambda)$ zu einer $\bar{w}(\lambda)$-Kurve. Auf eine bildliche Darstellung kann hier verzichtet werden, da die Werte K und W ebenfalls in die Reduktion auf ein eindimensionales reines Helligkeitssehen eingehen, worauf in den folgenden Abschnitten eingegangen wird.

Tabelle 8: Abbildungsgleichungen von einem deuteranomalen Farbenraum $(\vec{B}, \vec{G}, \vec{R})$ auf einen deuteranopischen Farbenraum $(\vec{K}, \vec{W})$. Aus einem Farbvektor $\vec{C} = B \cdot \vec{B} + G \cdot \vec{G} + R \cdot \vec{R}$ wird ein Farbvektor $\vec{C} = K \cdot \vec{K} + W \cdot \vec{W}$

H. S.: $K = B$
$W = 1 \cdot G + 4{,}0193 \cdot R$

M. B.: $K = B$
$W = 1 \cdot G + 3{,}1526 \cdot R$

R. H.: $K = B$
$W = 1 \cdot G + 6{,}7249 \cdot R$

K. S.: $K = B$
$W = 1 \cdot G + 3{,}3256 \cdot R$

E.6. Hellempfindlichkeitsfunktionen

Nach den Ausführungen der Abschnitte B.6. und D.4. erhält man eine Abbildungsgleichung, die der Abneyschen Gleichung für die Leuchtdichte entspricht.

Die Ergebnisse für die vier Versuchspersonen sind in Abschnitt E.3. beschrieben und in Tabelle 6 numerisch gegeben.

Spektralwerte sind spezielle Farbwerte. Die Anwendung der in Tabelle 6 gegebenen Gleichungen auf Spektralwerte $\bar{b}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{r}(\lambda)$ führt zu den gesuchten Hellempfindlichkeitsfunktionen $\bar{l}(\lambda)$. Die jeweiligen Gleichungen für $\bar{l}(\lambda)$ können der Tabelle 9 entnommen werden.

Tabelle 9: Hellempfindlichkeitsfunktion $\bar{l}(\lambda)$
mit Leuchtdichtebeiwerten β, γ und ϱ
gemäß $\bar{l}(\lambda) = \beta \cdot \bar{b}(\lambda) + \gamma \cdot \bar{g}(\lambda) + \varrho \cdot \bar{r}(\lambda)$

Normierung: $B(494)/G(494) = 1$
$R(583)/G(583) = 1$

H. S.: $\bar{l}(\lambda) = 0{,}0690 \cdot \bar{b}(\lambda) + 1 \cdot \bar{g}(\lambda) + 1{,}6077 \cdot \bar{r}(\lambda)$

M. B.: $\bar{l}(\lambda) = 0{,}0776 \cdot \bar{b}(\lambda) + 1 \cdot \bar{g}(\lambda) + 1{,}2610 \cdot \bar{r}(\lambda)$

R. H.: $\bar{l}(\lambda) = 0{,}1036 \cdot \bar{b}(\lambda) + 1 \cdot \bar{g}(\lambda) + 2{,}6896 \cdot \bar{r}(\lambda)$

K. S.: $\bar{l}(\lambda) = 0{,}0951 \cdot \bar{b}(\lambda) + 1 \cdot \bar{g}(\lambda) + 1{,}3301 \cdot \bar{r}(\lambda)$

Um einen Vergleich mit anderen Hellempfindlichkeitsfunktionen, insbesondere den zugrunde liegenden Leuchtdichtebeiwerten, durchführen zu können, ist diesmal nicht wie bei der Fehlfarbenbestimmung (Abschnitt D.3.) und der Alychnenbestimmung (Abschnitt D.4. und E.3.) die Normierung $1 : 0{,}4 = 2{,}5 : 1$ benutzt, sondern die normale Normierung $R(583)/G(583) = 1$. Die Werte für die Leuchtdichtebeiwerte β, γ und ϱ in Tabelle 9 ergeben sich dabei durch Umrechnung der Daten aus Tabelle 6. Wie am Ende des Abschnitts über Wechsel des Bezugssystems (Abschn. B.9.) erwähnt ist, transformieren sich die Leuchtdichtebeiwerte β, γ, ϱ wie die Primärvalenzen $\vec{B}$, $\vec{G}$, $\vec{R}$. Seien die Farbwerte in der (bisherigen) Normierung $R(583)/G(583) = 1 : 0{,}4$ mit B, G, R, die Farbwerte in der (normalen) Normierung $R(583)/G(583) = 1 : 1$ mit B', G', R' bezeichnet, so lautet der Zusammenhang zwischen den verschieden normierten Farbwerten folgendermaßen:

$$B' = B$$

$$G' = G$$

$$R' = 2{,}5 \cdot R$$

Der entsprechende Zusammenhang zwischen den Leuchtdichtebeiwerten lautet:

$$\beta' = \beta$$

$$\gamma' = \gamma$$

$$\rho' = \frac{1}{2{,}5}\ \rho$$

Damit ist gewährleistet, daß die Leuchtdichte

$$L = \beta\ B + \gamma\ G + \rho\ R = \beta'\ B' + \gamma'\ G' + \rho'\ R'$$

invariant gegenüber solchen Transformationen ist.

Die "roten" Leuchtdichtebeiwerte ρ' der Tabelle 9 sind danach aus denen der Tabelle 6 durch Multiplikation mit dem Faktor $\frac{1}{2{,}5} = 0{,}4$ entstanden. Die Tabelle 9 setzt aber auch voraus, daß die "roten" Kurven $\bar{r}(\lambda)'$ gegenüber den Kurven in den Abbildungen 10 bis 13 in den Ordinaten mit dem Faktor 2,5 multipliziert sind. In der Tabelle 9 ist nicht $\bar{b}(\lambda)'$, $\bar{g}(\lambda)'$, $\bar{r}(\lambda)'$ geschrieben, sondern die Apostrophe sind wieder fallen gelassen worden.

In den Abbildungen 14 bis 17 sind die aus den Spektralwerten und der zugehörigen Reduktionsgleichung bestimmten Hellempfindlichkeitsfunktionen gezeigt. Durch die berechneten Meßpunkte ist mit freier Hand eine glatte Kurve gezeichnet. Gestrichelt sieht man die Hellempfindlichkeitskurve eines Deuteranopen, die durch flimmerphotometrische Untersuchungen von Pitt (62) 1935

bestimmt worden ist, mit einem Maximum bei 560 nm.

Die Hellempfindlichkeitsfunktion des Deuteranomalen H.S. zeigt gegenüber der des Pittschen Deuteranopen eine merkliche Verschiebung ihres Maximums von 24 nm zu längeren Wellenlängen. Die Ergebnisse für die anderen Versuchspersonen lautet: Eine Abweichung von 14 nm für M.B., 27 nm für R.H. und 22 nm für K.S..— Alle Verschiebungen verlaufen zu längeren Wellenlängen.

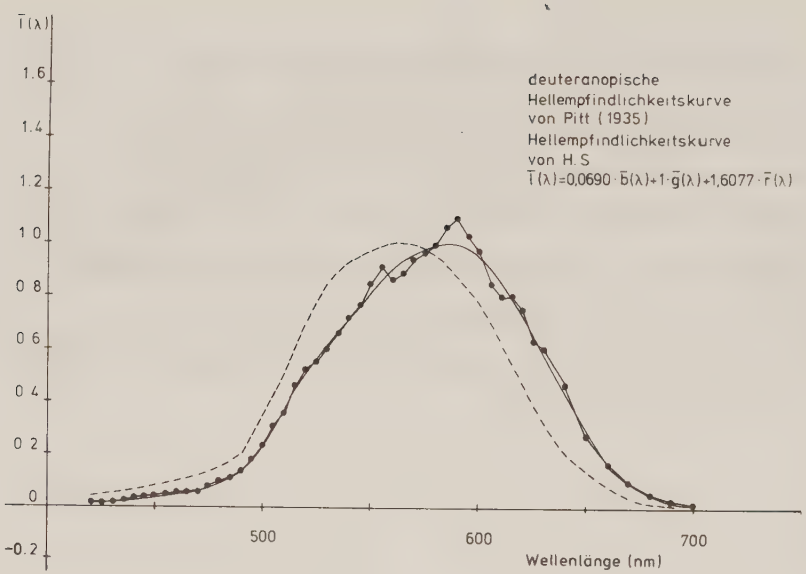


Abb. 14: Die spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion $\bar{l}(\lambda)$ der Versuchsperson H.S. ist über der Wellenlänge aufgetragen. Durch die aus den Spektralwerten und den zugehörigen Reduktionsgleichungen berechneten Meßpunkte ist aus der freien Hand eine glatte Kurve gezeichnet. Im Vergleich dazu zeigt die gestrichelte Kurve die Hellempfindlichkeitsfunktion eines Deuteranopen, die von Pitt 1935 durch flimmerphotometrische Untersuchungen bestimmt wurde. Es gelten die normale Normierung R(583)/G(583) = 1 und die Werte aus Tabelle 9.

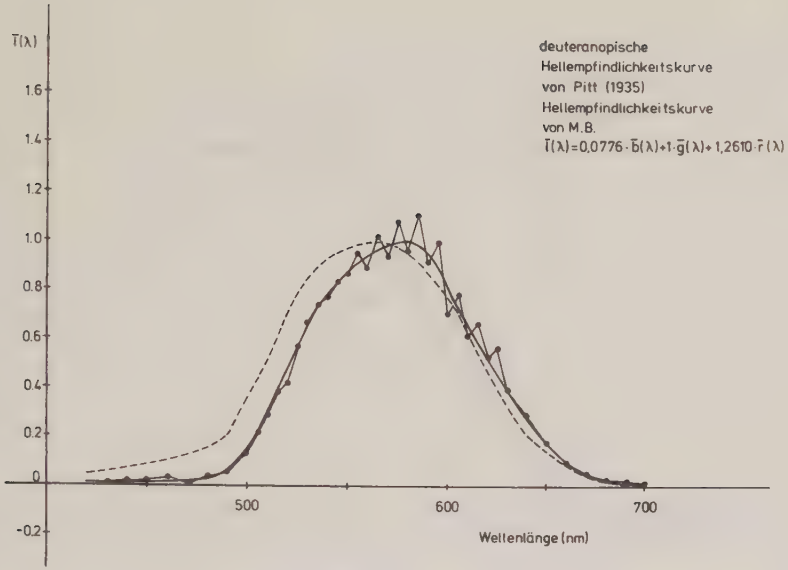


Abb. 15: Hellempfindlichkeitsfunktion der Versuchsperson M.B..
Weitere Erläuterungen siehe Abb. 14.

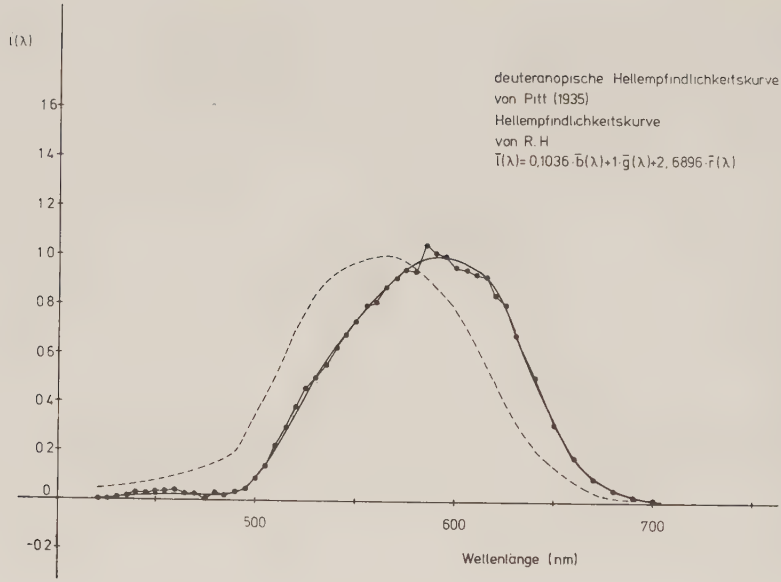


Abb. 16: Hellempfindlichkeitsfunktion der Versuchsperson R.H.. Weitere Erläuterungen siehe Abb. 14.

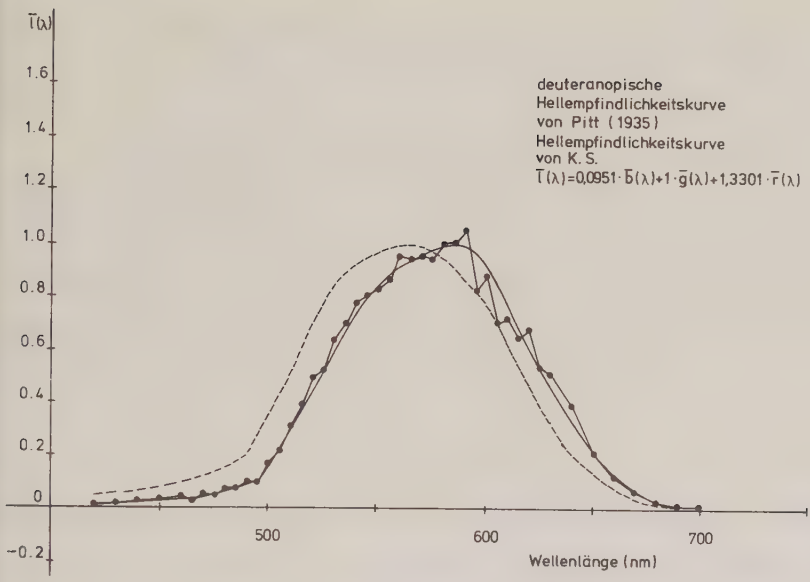


Abb. 17: Hellempfindlichkeitsfunktion der Versuchsperson K.S..
Weitere Erläuterungen siehe Abb. 14.

E.7. Interindividueller Vergleich der beiden deuteranomalen Brüder H.S. und K.S.

Nach von Kries (44) und weiteren Untersuchungen von Alpern et al. (7, 9, 10), siehe Abschnitt B.10., wurden die Quotienten Grünwert/Rotwert der Versuchsperson H.S. durch den Quotienten Grünwert/Rotwert der Versuchsperson K.S. dividiert und dann logarithmisch über der Wellenlänge aufgetragen. Unter Benutzung der mir vorliegenden Arbeiten erfolgte für die beiden Brüder H.S. und K.S. die Berechnung von insgesamt elf Meßwerten von 540 nm bis 640 nm. Dabei interessierte mich nicht mehr die allgemein akzeptierte Tatsache, daß die angeborene Deuteranomalie nicht auf prärezeptorielle Einflüsse zurückzuführen ist, sondern vielmehr sollte der Vergleich der beiden Deuteranomalen untereinander darlegen, ob sich die Abgleiche der Brüder signifikant voneinander unterscheiden. Ist letzteres der Fall, so würde das bedeuten, daß die beiden Deuteranomalen in ihren Pigmentabsorptionskurven untereinander abweichen, d.h., unterschiedlich starke Alterationen aufweisen.

Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse. Die Ordinate zeigt die logarithmisch aufgetragenen Differenzen des Quotienten Grünwert/Rotwert der beiden Brüder. Die Abbildung enthält eine gestrichelte horizontale Linie k', die als mittlere geschätzte Anpassung entsprechend den Ordinatenwerten gilt. Die offenen Kreise geben den errechneten Differenzwert für jede Wellenlänge wieder. Eingezeichnet ist außerdem die Standardabweichung jedes einzelnen Ordinatenwertes. Da die Standardabweichung nicht als homogen über der Wellenlänge bezeichnet werden kann, mußte

gemäß Moeller (7) das in Abschnitt B.10. erläuterte Verfahren angewandt werden.

Das Ergebnis des statistischen Tests für S ist in Abbildung 18 eingetragen; ebenfalls ist die Wahrscheinlichkeit P = 0,001 gekennzeichnet, bei der die χ^2-Variable für die hier vorliegenden 10 Freiheitsgrade den Wert für S übersteigt.

Die deuteranomalen Brüder H.S. und K.S. unterscheiden sich somit deutlich auf dem Signifikanzniveau von 0,1%.

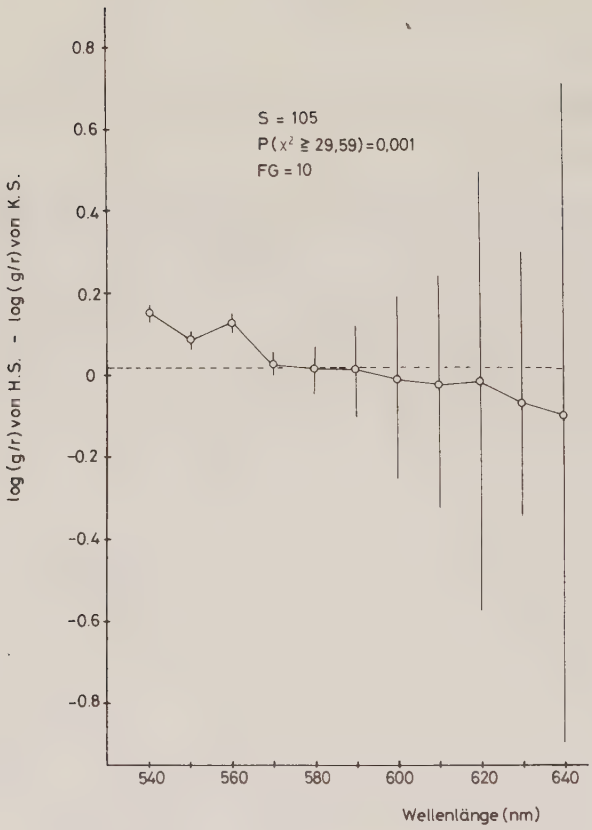


Abb. 18: Interindividueller Vergleich der beiden deuteranomalen Brüder H.S. und K.S.. Die Abbildung zeigt in logarithmischer Form die Differenzen der Quotienten Grünwert/Rotwert über der Wellenlänge aufgetragen. Die getrichelte Linie ist eine geschätzte Gerade, die sich der wellenlängenunabhängigen Variablen k' am besten annähert. Die beiden Deuteranomalen unterscheiden sich auf dem Signifikanzniveau $\alpha = 0{,}001$.

F. Diskussion

F.1. Fehlfarbe

Die Bestimmung der Fehlfarbe brachte etwas andere Ergebnisse, als zunächst zu erwarten war. Die Versuchsperson M.B. erwies sich bei den Messungen am Dreifarbenmeßgerät, entgegen den Anomaloskop-Einstellungen, als voll extrem umstimmbar (siehe Abschn. D.1.), d.h., seine Verwechslungsgeraden verliefen über den gesamten Bereich der (g,r)-Farbtafel (Abb. 5). Dagegen konnte die vollextreme Umstimmbarkeit des Deuteranomalen K.S. nicht bestätigt werden. Seine Verwechslungsgeraden erreichen wohl den purpurnen Teil der Farbtafel, nicht jedoch die grünblaue Seite. Die beiden anderen Versuchspersonen H.S. und R.H. bestätigten ihre am Anomaloskop eingestellten Abgleiche. Somit dürfen Anomaloskop-Einstellungen nicht allein zur endgültigen Klassifizierung herangezogen werden.

R.H. erwies sich, seiner Umstimmbarkeit entsprechend, als derjenige Deuteranomale mit der geringsten Zahl der Verwechslungspunkte, insgesamt nur 19 (Abb. 6). Seine Umstimmbarkeit beschränkte sich auf einen kleinen Teil der Farbtafel. Im gesamten bläulichen Bereich war es ihm nicht möglich, innerhalb der vorgeschriebenen 15 s Adaptationsdauer (19) zu verwechseln. Das ist ein Ausdruck dafür, daß im überwiegend blauen Bereich der Einfluß einer Veränderung der grünen Mischungskomponente eine derartige Verschiebung des Blautons, d.h. der Blausättigung, herbeiführt, daß sich diese durch Adaptationsmechanismen oder Variieren von Rot und Blau nicht zur Gleichheit bringen läßt. Dieses Phänomen trat bei dem Deuteranomalen R.H. auf, nicht jedoch

bei den halbextrem bzw. vollextrem umstimmbaren drei Versuchspersonen. Bei ihnen spielte es keine Rolle, in welchem Gebiet der Farbtafel die Farbreize angeboten wurden. Auch die berechneten Fehlpunkte zeigten keine besonderen Auffälligkeiten, ob sie nun im grünen, roten, gelben oder blauen Bereich bestimmt wurden.

Die ermittelten Farbörter können als sicher und genau betrachtet werden, da strikt darauf geachtet wurde, daß die Versuchspersonen ohne Störung, ohne Überanstrengung und unter optimalen äußeren Bedingungen ihre Abgleiche absolvieren konnten. Das Auge war neutral gestimmt und nicht etwa durch vorherige farbliche Adaptation beeinflußt. Anomale Trichromaten sollen zudem die gleiche Präzision wie Normalsichtige besitzen (44), was die Streuung der jeweiligen Farbabgleiche betrifft. Die Abgleiche von R.H. besaßen die höchste Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Einstellung. Natürlich können die Einflüsse der durchstrahlten Augenmedien (Cornea, Linse und Glaskörper) nicht verhindert werden. Diese prärezeptoriellen Einflüsse könnten etwa zu Veränderungen in der Helligkeitsverteilung führen (6). Dieser Einfluß war aber bei allen Versuchspersonen gegeben, so daß dadurch wohl keine größeren interindividuellen Fehler entstehen konnten. Als Erklärung für irgendeine Art von angeborener Farbenfehlsichtigkeit können sie jedenfalls nicht dienen. Das Problem der Maculapigmentierung wurde, wie schon in Abschnitt D.3. beschrieben, durch die blau-grüne Normierung aufgefangen. Dabei stellte jede Versuchsperson in regelmäßigen zeitlichen Abständen für sich persönlich die Trendelenburg-Gleichung auf,

während eine normalsichtige Person für die Rayleigh-Gleichung zuständig war. Um einen Eindruck zu vermitteln, wie groß die Schwankungen interindividuell waren, gebe ich hier die mittleren Werte für jede Versuchsperson an. Für den Übergang vom (D,E,F)-System des Dreifarbenmeßgerätes auf das Wrightsche (B,G,R)-System mußte der Farbwert D im Durchschnitt mit folgenden Faktoren multipliziert werden: H.S. mit 0,59, M.B. mit 0,28, R.H. mit 0,32, K.S. mit 0,39. Diese Werte zeigen, daß die Maculapigmentierung, wie nicht anders zu erwarten (43, 71, 98), doch erheblich streut. Andererseits bewirkt die blaugrüne Normierung die Möglichkeit, die Ergebnisse trotzdem miteinander zu vergleichen, da das Problem der Maculapigmentierung doch weitgehend beseitigt ist. Auf die Lage des Fehlpunktes etwa hat dieser Störfaktor ohnehin keinen Einfluß, da bei der Aufstellung eines Differenzvektors innerhalb des Farbenraums der Blauanteil keine Rolle spielt, weil er zu keiner Gelegenheit variiert zu werden brauchte. Die blaue Farbkomponente bleibt somit bei der Reduktion der anomalen Trichromasie auf die Deuteranopie unberührt (92).

Die Normierung des roten Farbwertes R gemäß dem Verhältnis $R(583)/G(583) = 0,4$ gewährleistet, daß die Verwechslungsgeraden die rot-grüne Dreiecksseite oberhalb der Primärvalenz $\vec{G}$ schneiden. An welcher Stelle die Linien schneiden, hängt nämlich von der Art der zentralen Projektion des Farbenraums auf die Farbtafel (56, 57) ab. Dafür sind die Wahl der Primärvalenzen und die jeweilig vorgenommene Normierung verantwortlich.

Pitt (63) wollte aus den parallel zur rot-grünen Dreiecksseite verlaufenden Verwechslungsgeraden physiologische Rückschlüsse herleiten. Er nahm an, daß es sich bei der Deuteranopie um eine Fusion der roten und grünen Empfindung handeln müsse. Er glaubte, daß alle nicht völlig parallel verlaufenden isochromatischen Linien, die eventuell die rot-grüne Dreiecksseite schneiden würden und damit für ein völliges Fehlen einer Empfindung sprächen, durch geeignete rechnerische Veränderungen parallel geschaltet werden können. Diese Annahme läßt sich durch das oben gesagte leicht als mathematisch nicht haltbar widerlegen. Daß die von Pitt bestimmten deuteranopischen und auch protanopischen Verwechslungsgeraden völlig korrekt bestimmt sind, kann man daraus sehen, daß auch meine Linien bei Unterlassung der Normierung einen fast parallelen Verlauf zur rot-grünen Dreiecksseite nehmen und erst weit oberhalb von G die rot-grüne Dreiecksseite schneiden würden. Aus dieser Tatsache jedoch eine Fusionsdeuteranopie zu schließen, ist verfehlt.

F.2. Die Lage des Fehlpunktes

Die Farbart der Fehlfarbe wird durch den Fehlpunkt beschrieben (Abschn. D.3.). Die Versuchsperson R.H. liegt mit ihrem mittleren Fehlpunkt (Tab. 3, Abb. 9) sehr nahe am Farbort für die grüne Primärvalenz $\vec{G}$, während die anderen drei mit ihren Fehlpunkten mehr oder weniger weit von $\vec{G}$ entfernt liegen. Vergleichbare von anderen Autoren gefundene, im (B, G, R)-System bestimmte Daten liegen nur wenige vor. Während meine vier Deuteranomalen in ihren mittleren Fehlpunkten von r= -0,1747 (R.H.)

bis r = -0,4645 (M.B.) reichen, findet man bei Scheibner und Ludwig (82) für zwei Deuteranomale mit halbextremer Umstimmbarkeit Werte von r = -0,4848 und r = -0,6121. Meine Ergebnisse, die intraindividuell starken Streuungen unterliegen (siehe Abb. 4 bis 7 und Tab. 2a bis 2d) und nicht unbedingt auf eine Einheitlichkeit schließen lassen, können ihren Grund in der ungünstigen Lage der grünen Fehlfarbe in bezug auf die Farbtafel haben oder auch in der Tatsache, daß die vorliegenden Deuteranomalen keine gleichgeartete Farbenfehlsichtigkeit aufweisen. Dieses Phänomen soll noch statistisch geprüft werden (Abschn. F.3.).

Es bietet sich natürlich ein Vergleich mit der schon häufiger untersuchten Gruppe der Deuteranopen an. In der schon erwähnten Arbeit von Scheibner und Ludwig wurden auch vier Deuteranope untersucht. Mit in den Vergleich einbeziehen möchte ich auch eine Arbeit von Kröger (45) mit fünf Deuteranopen. Es ergeben sich hierbei Werte für r von -0,9249 bis -0,4872, im Mittel r = -0,6564. Scheibner und Ludwig schließen aus der Gleichartigkeit der Gleichungen ihrer Deuteranomalen mit denen der Deuteranopen, daß die allgemein angenommene Auffassung stimmt, daß Deuteranope und Deuteranomale denselben kurzwelligen und denselben langwelligen Mechanismus besitzen.

Mit dem Hinweis auf meine doch etwas anders gelagerten Fälle, will ich diese Frage zunächst offenlassen. Die Beziehung zwischen Deuteranomalie und Deuteranopie wird noch behandelt.

F.3. Prüfung auf Homogenität der Fehlfarben

Zur statistischen Prüfung der interindividuellen Variabilität bietet sich der H-Test nach Kruskal und Wallis an (78).
Zu testen war die Hypothese, ob die gemessenen Fehlpunkte der gleichen Grundgesamtheit entstammen. Als Meßwerte dienten die mittleren Fehlfarben jeder Verwechslungsgeraden der vier Deuteranomalen. Der rote Farbwert R_F wurde der Größe nach aufsteigend geordnet und mit Rängen von 1 bis 42 versehen. Die Berechnung der Prüfgröße H ergab mit dem Signifikanzniveau $\alpha = 0{,}001$, daß die Fehlfarben nicht einer gemeinsamen Grundgesamtheit entstammen. Dieses Resultat war nach den heterochromen Ergebnissen durchaus zu erwarten.

F.4. Wie ist die Lage der Fehlpunkte zu interpretieren?
Vergleich mit anderen Autoren

Die Fehlfarbenbestimmung, wie sie von mir durchgeführt wurde, geht zurück auf Maxwell (49, 50). Nach ihm ist das Wesen der Dichromasie durch das Fehlen eines "Drittels" und das Verbleiben von zwei unabhängigen Variablen gekennzeichnet. Einen guten Überblick über die Lage des Fehlpunktes im CIE-System gibt eine Arbeit von Terstiege (101 und Abb. 19). Dabei zeigen sich,im Gegensatz zur einheitlichen protanopischen Fehlpunktslage ($x_p = 0{,}75$, $y_p = -0{,}25$) und auch zu den tritanopischen Fehlpunktskoordinaten,für die Deuteranopie doch erhebliche Differenzen.

Vos und Walraven (102) sprechen von einer Lage, die durch $x_d = 1,4$ und $y_d = -0,4$ gekennzeichnet ist. Nyberg und Justowa (56) geben folgende Grenzen für die Lage des Fehlpunkts an: $1,6 < x_d < 1,8$ und $-0,7 < y_d < -0,6$. Judd (37) findet unter Benutzung der Werte von Pitt (52) für $x_d = 1,0$ und für $y_d = 0,0$; er legt also den Fehlpunkt seines Deuteranopen auf die trichromatische Alychne und stellt ihn gleich mit der roten Primärvalenz $\vec{X}$. Nimeroff gibt Werte von verschiedenen Autoren an (55), die mit $1,08 \leqq x_d \leqq 2,3$ und $-1,3 \leqq y_d \leqq -0,08$ beschrieben sind. Als mittleren Wert gibt er $x_d = 1,54$ und $y_d = -0,54$ an. Dieser Wert stimmt auch mit den schon in Abschnitt F.2. erwähnten Angaben von Scheibner et al. (96) überein, die einen Wert von etwa $x_d = 1,5$ und $y_d = -0,5$ angeben.

		x_0	y_0	x_1	y_1	x_1	y_1
1	König-Judd	0,814	0,186	−0,636	1,636	0,068	−0,026
2	König-Ives	0,814	0,186	−0,636	1,636	0,155	0,002
3	Wright	0,737	0,264	2,88	−1,73	0,133	0,022
4	Walters	0,753	0,249	16,80	−14,69		
		0,744	0,257	11,14	−9,42		
5	Thomson-Wright	0,746	0,253	−5,94	6,91	0,175	0,004
6	Sperling	0,746	0,252	−5,64	7,69	0,170	−0,002
7	Pitt-Judd	0,747	0,253	1,08	−0,08		
8	Judd	0,747	0,253	1	0	0,180	0
9	LeGrand	0,747	0,253	1,08	−0,08	0,180	0
10	Steffen	0,735	0,265	1,21	−0,21	0,173	0,005
11	MacAdam	0,747	0,253	1,75	−0,75	0,180	0
12	MacAdam	0,747	0,253	0,685	−5,85	0,180	0
13	Pitt	0,744	0,257	1,286	−0,247		
14	Pitt	0,744	0,257	10,88	−9,64	0,159	0,004
15	Bouma	0,739	0,261	1,121	−0,121	0,006	0,025
16	Justova	0,747	0,250	1,74	−0,73		
17	Justova	0,748	0,252	1,65	−0,65	0,174	0,002
18	Nyberg-Justova	0,75	0,25	1,70	−0,70	0,17	0
19	Lobanova-Rautian	0,738	0,260	1,357	−0,381	0,168	0
20	Burnham-Brewer	0,742	0,277	0,753	0,020	0,201	−0,004
21	Fedorov u.a.	0,825	0,175	−1,223	2,223	0,157	0,001
22	Szekeres	0,736	0,264	1,458	−0,456	0,174	0,003
23	Kustarev	0,735	0,265	1,43	−0,430	0,173	0,005
24	Boynton	0,751	0,250	1,07	−0,055	0,168	0,004
25	Stiles	0,788	0,213	2,112	−1,108	0,175	−0,017
26	de Vries	0,733	0,267	−∞	∞	0,248	0,0002

Abb. 19: Fehlpunkte in der Literatur aus Terstiege (102).

Die Fehlfarben der Deuteranopen sind offensichtlich nicht sehr einheitlich, d.h., die Reduktion vom dreidimensionalen Farbenraum führt nicht bei allen Deuteranopen auf ein und denselben zweidimensionalen Unterraum.

Der anomale Grünmechanismus eines Deuteranomalen ist durch die Reduktion nach einer Fehlfarbe auf eine Dichromasie ausgeschaltet, zumindest ist ihm seine anomale Natur genommen. Die Lage eines solchen Fehlpunktes kann folglich interpretiert werden als Ausdruck des Einflusses des verbliebenen Erythrolabs (46). Je weiter der Fehlpunkt von der grünen Primärvalenz entfernt liegt, um so mehr nähert er sich der Lage des protanopischen Fehlpunktes, er kann praktisch sogar, bei extremer Lage, auf der verlängerten rot-grünen Dreiecksseite unterhalb der Primärvalenz $\vec{R}$ zu liegen kommen (92).

Abbildung 9 gibt die Lage der mittleren Fehlpunkte jeder Versuchsperson wieder. Da die Bestimmung der Fehlpunkte jeweils mit identischen Primärvalenzen erfolgte, ist eine Projizierung der vier verschiedenen Farbtafeln übereinander erlaubt. Die Versuchsperson M.B. liegt dabei mit ihren Werten noch am ehesten im Bereich der deuteranopischen Fehlpunkte, so daß er der Deuteranopie sehr nahe kommt.
Tabelle 4 und Abbildung 8 geben die Fehlpunktslage nach Transformation in das CIE-System wieder nach dem Verfahren aus Abschnitt B.9.. Außer der Versuchsperson M.B. bieten die anderen drei Versuchspersonen kaum eine Übereinstimmung mit den deuteranopischen Fehlpunktswerten der oben erwähnten Autoren (siehe Abb. 19).

Die Tabelle von Terstiege gibt allerdings auch einige Ergebnisse wieder, die in den Bereich meiner Werte reichen, so die Werte von König-Judd und von Stiles.

Diese Vergleichswerte zeigen auch durchaus die Möglichkeit, daß der deuteranopische Fehlpunkt, wie bei der Versuchsperson R.H., oberhalb von $\vec{Y}$ erscheint. Es ist jedoch auch nicht ausgeschlossen, daß er in Richtung der protanopischen Fehlfarbe auf der rot-grünen Dreiecksseite verlaufen kann bis hin zur Identität mit der roten Primärvalenz $\vec{X}$ (siehe Abb. 8). Dennoch ist bei dieser Betrachtung eine Einschränkung zu machen. Als gesichertster Bereich für die Lage des deuteranopischen Fehlpunktes sind nämlich die Wertebereiche $1{,}3 \leqq x_d \leqq 1{,}8$ und $-0{,}8 \leqq y_d \leqq -0{,}3$ anzusehen. Bei den anderen Werten sind zumindest Zweifel an ihrer Richtigkeit angezeigt.

Was die von mir untersuchten Deuteranomalen betrifft, so muß man sich fragen, was zu dieser doch erheblichen Inhomogenität führt.

F.5. Deuteranomalie und die Dichromasie

Das zunächst von Lord Rayleigh (66) entdeckte Wesen der Deuteranomalie drückt sich, einfach formuliert, darin aus, daß der Deuteranomale die Abgleiche des Trichromaten im allgemeinen nicht anerkennt und umgekehrt. Die Deuteranomalie unterscheidet sich von der normalen Trichromasie zumindest durch ein alteriertes Pigment (70, 87, 99). Durch densitometrische Messungen konnte dieses anomale Pigment nicht entdeckt werden (75, 4).

Da Deuteranope, die nachweislich nur das Pigment Erythrolab, identisch mit dem des Normalen (6,11,51,73,76,85), im mittel- und langwelligen Bereich besitzen, die Abgleiche eines Deuteranomalen im allgemeinen anerkennen (90), läge beim Deuteranomalen eine Alteration nur eines Pigmentes vor, d.h., neben dem normalen kurzwelligen und langwelligen Mechanismus (59,87,99) fände sich noch ein mittelwelliges, "anomales" Pigment.
"Extreme" Deuteranomale verhalten sich ähnlich wie Deuteranope (6). Dies kann auf die Versuchsperson M.B. zutreffen.
Die sogenannten "einfachen" Deuteranomalen (21) zeigen zwei empfindliche Pigmente im rot-grünen Bereich. Dies spricht für die Möglichkeit, wie auch die Heterogenität der untersuchten Deuteranomalen beweist, daß es keinen einheitlichen Grün-Anomalen-Typus gibt (54). Pitt (64) spricht von zwei Formen der Deuteranomalie, einer deuteranopischen, mit mehr oder weniger Verlust des Grüns, und einer mit übersteigertem Rotanteil. Die Deuteranomalie drückt sich dadurch aus, daß sie gegenüber den trichromatischen drei Pigmenten abweicht. Der äußerste Grad der Abweichung wäre eine Übereinstimmung mit der Deuteranopie (108). Die Abweichungen bei der Fehlfarbenbestimmung unter den Deuteranopen und auch den untersuchten Deuteranomalen legt den Gedanken nahe, daß es mehr als eine Möglichkeit der Reduktion von der anomalen Trichromasie auf die Dichromasie gibt.
Für die andere Art der normalen Trichromasie, der Protanomalie, liegen Ergebnisse vor, die auf die Alteration nur eines Pigmentes deuten (58, 64, 86), während andere Autoren von der Alteration mindestens eines Pigmentes sprechen (5, 88, 89, 112).

Die Vermutung ist aufgekommen, daß es sich bei den anomalen Pigmenten der beiden Typen von Anomalen um ein und dasselbe Pigment handelt (25, 48). Diese Möglichkeit wird von anderen Autoren jedoch zurückgewiesen (65).
Als gesichert zur Farbenfehlsichtigkeit kann nur folgendes angesehen werden: Protanopen und Deuteranopen besitzen nur je einen empfindlichen Mechanismus im mittel- und langwelligen Bereich, nämlich Chlorolab bzw. Erythrolab. Diese beiden Pigmente entsprechen wahrscheinlich denen der normalen Trichromaten. Deuteranomale und Protanomale unterscheiden sich sowohl von den Trichromaten als auch von den Dichromaten, was auf die Alteration eines oder auch mehrerer Pigmente zurückzuführen ist.

F.6. Der anomale trichromatische Farbenraum

Der dichromatische Farbenraum kann, als echte Reduktionsform, mit seinen dichromatischen Farbvalenzen völlig im trichromatischen Farbenraum enthalten sein, und er ist somit durch eine lineare Abbildung mit ihm verbunden (81).
Bei den anomalen Trichromaten sind jedoch die Farbreize zu anderen Klassen metamerer Reize zusammengefaßt als bei den Trichromaten. Es besteht also keine direkte Reduktionsbeziehung zwischen den genannten Trichromaten (90). Das bedeutet, daß ein Normaler und ein Anomaler zu einem vorgegebenen Farbreiz im allgemeinen an einem Dreifarbenmeßgerät zwei nicht identische Abgleiche einstellen. Eine eindeutige Zuordnung eines Farbvektors im normalen System zu einem Farbvektor im anomalen trichromatischen System ist nicht gewährleistet (116). Somit ist der

Farbenraum des anomalen Trichromaten keine lineare Abbildung des dreidimensionalen Vektorraums des normalen Trichromaten, eine valenzmetrische Umrechnung ist also nicht möglich.
Es taucht jedoch aus dem gerade Gesagten eine Schwierigkeit auf. Da der deuteranomale Farbenraum weder dem trichromatischen noch dem dichromatischen Farbenraum eindeutig zuzuordnen ist, bleibt er unbestimmt,und eine Transformation z.B. vom (B, G, R)-System in das CIE-System ist nicht eindeutig (89). Es ist also wenig sinnvoll z.B. Spektralwertkurven, die an Deuteranomalen bestimmt worden sind, in das CIE-System oder etwa in das sogenannte (P, D, T)-Grundvalenzsystem des normalen Trichromaten umzurechnen. Ein Vergleich mit trichromatischen Werten, für die die Transformationen vorgenommen werden können, ist nicht möglich (116). Somit beschränkt sich ein Vergleich auf das System, in dem die anomalen trichromatischen Werte gewonnen wurden, also auf das (B, G, R)-System. Erst neuere Untersuchungen werden vielleicht die Möglichkeit eines Übergangs von gemessenen anomalen Spektralwertkurven in ein System der anomalen Grundvalenzen (112) bieten.
Ich glaube, daß trotz der aufgeführten Bedenken eine Transformation, zumindest der Fehlpunkte, gerechtfertigt ist. Hierbei handelt es sich um die Elimination des anomalen trichromatischen Pigments, d.h., es erfolgte eine Reduktion von der anomalen Trichromasie auf die Deuteranopie, und für diese ist eine Transformation erlaubt. Die Frage ist jedoch, ob die durch diese Reduktion verbliebenen Mechanismen dem kurz- und dem langwelligen Mechanismus des Deuteranopen entsprechen? Wenn diese Voraussetzung der Gleichartigkeit erfüllt ist, ist gemäß dem oben Gesagten eine Transformation in das Normvalenzsystem CIE 1931 erlaubt.

F.7. Spektralwertkurven

Wie schon im vorigen Abschnitt erwähnt, wird ein Vergleich der vier von mir untersuchten deuteranomalen Spektralwertkurventripel am zweckmäßigsten im Wrightschen (B, G, R)-System durchgeführt. Zu diesem Zwecke wurden die Werte des Farbmetrischen Normalbeobachters CIE 1931, modifiziert nach Judd (38), aus dem CIE-System in das (B, G, R)-System zurückgerechnet. Es können hier jedoch nur Aussagen über den Trend der Abweichungen gemacht werden, da ein Rückschluß auf die wirklichen spektralen Empfindlichkeitskurven des Zapfenapparates so nicht möglich ist.

Erwartungsgemäß läßt sich die Verschiebung der mittelwelligen Spektralwertkurve $\bar{g}(\lambda)$ zu längeren Wellenlängen eindrucksvoll bestätigen (Abb. 10 bis 13, Tab. 7 und Abschn. E.4.). Auffällig ist, daß es sich zwar um eine einheitliche Tendenz handelt, daß die Abweichungen jedoch in starkem Maße streuen.

Ähnliches läßt sich auch zur langwelligen Kurve $\bar{r}(\lambda)$ sagen. Hier zeigen sich drei Versuchspersonen mit einer nahezu einheitlichen Verschiebung ebenfalls zu längeren Wellenlängen. Die Versuchsperson M.B. bildet eine Ausnahme mit einer Verschiebung von $\bar{r}(\lambda)$ zu kürzeren Wellenlängen.

Wie aus den Abbildungen 10 bis 13 zu ersehen ist, schneiden sich die blaue und grüne Kurve per definitionem bei der Wellenlänge 494 nm, und die Kurve $\bar{g}(\lambda)$ hat bei $\lambda = 583$ nm das 2,5-fache des Ordinatenwertes der Kurve $\bar{r}(\lambda)$, entsprechend der vorgenommenen Normierung. Die Versuchspersonen selbst sind für die Normierung bei $\lambda = 494$ nm verantwortlich. Das erklärt den recht unterschiedlichen Verlauf der jeweiligen $\bar{b}(\lambda)$-Kurven. Die aufsteigende

Flanke der $\bar{g}(\lambda)$-Kurve im Bereich von 490 nm bis 550 nm beeinflußt maßgeblich den Verlauf der Blaukurve. Stimmt der Verlauf der Grünkurve in diesem Bereich mit dem Verlauf der Grünkurve des CIE-Normalbeobachters von 1931 überein, so verläuft auch die $\bar{b}(\lambda)$-Kurve der jeweiligen Versuchsperson in ähnlicher Weise wie die Blaukurve des Normalbeobachters. Dies trifft, wie Abbildung 10 zeigt, für die Versuchsperson H.S. weitgehend zu. Für die drei anderen Versuchspersonen (Abb. 11 bis 13) bestimmt die zum Normalbeobachter unterschiedlich stark abweichende $\bar{g}(\lambda)$-Kurve auch ein Niederdrücken der $\bar{b}(\lambda)$-Kurve gegenüber dem Normalbeobachter. Der zunächst bei der Betrachtung der Abbildungen 10 bis 13 aufkommende Verdacht einer Alterierung der $\bar{b}(\lambda)$-Kurve ist somit hinfällig.

Eine ganze Reihe von Autoren haben sich mit dem Verlauf von Spektralwertkurven bei anomalen Trichromaten befaßt. Beeinflußt durch Maxwell und die Aufstellung seiner "color matching functions" folgten weitere Untersuchungen. Von Kries (42, 43, 44) folgerte, daß das abweichende anomale Farbensehen nicht durch die okularen Medien verursacht sein könne, sondern er nahm, wie auch König und Dieterici (41), eine Alteration mindestens eines Pigmentes an. Pitt (62), Nelson (54) und Wright (115) stellten Abweichungen der Grünkurve zu längeren Wellenlängen gegenüber normalen Trichromaten fest.
Hurvich und Jameson (33) diskutieren eine Verschiebung aller drei Empfindlichkeitskurven um 7 bis 15 nm zu längeren Wellenlängen für Deuteranomale und im gleichen Ausmaß zu kürzeren Wellenlängen für Protanomale.

Pokorny, Smith et al. (65, 97) beschreiben die Deuteranomalie mit einem normalen Rotpigment bei λ_{max} = 560 nm und einem "anomalen" Pigment, verschoben gegenüber dem normalen Grünpigment (λ_{max} = 534 nm) um 20,6 nm nach längeren Wellenlängen. Für die Protanomalie geben sie bei normalem Grünpigment eine Verschiebung des "anomalen" Pigments vom normalen Rotpigment um 18,4 nm zu kürzeren Wellenlängen an.

Walraven et al. (106) vermuten für Deuteranomale eine im Vergleich zum Normalen identische Rotkurve und eine anomale Grünkurve, die erheblich zu längeren Wellenlängen verschoben ist.

Walraven (107) diskutiert das Vorhandensein einer zu längeren Wellenlängen verschobenen Grünkurve und zusätzlich eines abgeschwächten Rotpigments, eventuell auch eines dem normalen langwelligen ähnlichen Pigments, das zu kürzeren Wellenlängen abweicht.

Rushton et al. (77) legen sich für Deuteranomale auf das normale trichromatische Erythrolab und auf ein gegenüber dem normalen Chlorolab um 15 nm zu längeren Wellenlängen verschobenes Deutanolab fest. Entsprechend gelten für Protanomale ein normales Chlorolab und ein um 15 nm zu kürzeren Wellenlängen verschobenes Protanolab.

Watkins (109) gibt eine Abweichung des deuteranomalen π_4-Mechanismus (nach Stiles) von 10 nm zum roten Spektrumsende an.

Piantanida und Sperling (59, 99) sprechen von sogenannten "einfachen" und "extremen" Deuteranomalen (und entsprechend auch von Protanomalen). Danach sei eine einfache ("simple") Deuteranomalie dadurch ausgezeichnet, daß die mittlere Spektralwertkurve gegenüber der des normalen Trichromaten lediglich verschoben sei, und zwar um etwa 20 nm zu längeren Wellenlängen. Bei der extremen Deuteranomalie sei eine Herabsetzung der mittleren Spektralwertkurve allein oder zusätzlich zu ihrer Verschiebung maßgebend.

Diese Einteilung erinnert an die von Pickford (61), der bei der einfachen Deuteranomalie eine Verschiebung von 25 nm, bei der extremen Deuteranomalie eine Verschiebung von 37 nm für die mittlere Spektralwertkurve angibt, jeweils zum langwelligen Spektrumsende hin.

Jacobs (34) gibt für die Lage des protanomalen Pigments eine Verschiebung von 10 bis 15 nm zu kürzeren Wellenlängen und für das deuteranomale Pigment eine Verschiebung von 10 bis 25 nm zu längeren Wellenlängen an.

Alpern und Moeller (10) behaupten, die Deuteranomalen hätten nicht etwa, wie üblicherweise angenommen, normales Cyanolab, normales Erythrolab und ein anomales Deutanolab, sondern sie besäßen verschiedene Deutanolab, die den langwelligen Pigmenten unterschiedlicher Deuteranopen entsprechen.

Die bei den von mir untersuchten Deuteranomalen gefundenen Charakteristika stimmen, was den Verlauf der mittleren Empfindlichkeitskurve $\overline{g}(\lambda)$ betrifft, mit den Ergebnissen der anderen Autoren weitgehend überein. Diesem Pigment "Deutanolab" kann ein Verlauf mit einer recht unterschiedlichen Verschiebung von 5 nm bis 25 nm, immer zu längeren Wellenlängen, zugeschrieben werden.

Daß der rotempfindliche langwellige Mechanismus ebenfalls alte-

riert ist, wird in der Literatur meist verneint. Jedoch ist auch nach meinen Ergebnissen für die $\bar{r}(\lambda)$-Kurve nicht mit Sicherheit zu sagen, daß es sich bei ihr um das Absorptionsverhalten des "normalen" Rotpigments handelt. Vielmehr scheint es so zu sein, daß, wie es auch Deuteranope mit verschiedenen langwelligen Mechanismen gibt, auch Deuteranomale existieren, die neben einer Abweichung der mittelwelligen Kurve auch im langwelligen Bereich Differenzen untereinander und gegenüber der Rotkurve des Normalbeobachters aufweisen (9).

Die noch nicht ausgebaute Möglichkeit einer Umrechnung auf die normalen Grundvalenzen $(\vec{P}, \vec{D}, \vec{T})$ verhindert eine weiterführende Diskussion der mit psychophysischen Mitteln gemessenen Spektralwertfunktionen, denn nur diese sind mit der wirklichen Funktion des Zapfenapparates zu vergleichen.

F.8. Alychne, Alychnenspur und Leuchtdichtebeiwerte

Wie aus den Werten von Tabelle 5 und der Betrachtung von Abbildung 9 zu ersehen ist, liegen die mittleren Querpunkte der Versuchspersonen sehr eng im Bereich der blauen Primärvalenz $\vec{B}$ beieinander. Die Verbindung dieser Punkte mit den mittleren Fehlpunkten bildet die jeweilige Alychnenspur, deren Steigung entsprechend den verschiedenen Fehlpunktlagen variiert. Alle Vektoren, die in der Alychne, der "Lichtlosen", liegen, befinden sich im dreidimensionalen Raum in einer Helligkeitsebene mit der Leuchtdichte Null, d.h., sie sind leuchtdichtefrei. Die Alychnenspur verläuft außerhalb des Farbdreiecks.

Aus der Tabelle 9 kann man die Leuchtdichtebeiwerte β, γ und ρ für die einzelnen Versuchspersonen entnehmen. In die Gleichungen

eingegangen ist diesmal die "normale" 1 : 1 Normierung, d.h., die von mir benutzte Normierung R(583)/G(583) = 0,4 wurde auf den Wert 1 transformiert. Die Angabe in der Form der Tabelle 6 bietet die Möglichkeit, die β-, γ- und ρ-Werte direkt mit den Wrightschen Leuchtdichtebeiwerten für den trichromatischen Normalbeobachter zu vergleichen (115):

$$\beta = 0{,}052 \qquad \gamma = 1{,}0 \qquad \rho = 0{,}65 \ .$$

Während die Werte der Deuteranomalen für ρ von 1,2610 (M.B.) bis zu 2,6896 (R.H.) schwanken und damit den zwei- bis vierfachen Wert des normalen Trichromaten annehmen, stimmen die Werte für den blauen Leuchtdichtebeiwert β relativ gut überein. Bei den Deuteranomalen wird die Leuchtdichte im überwiegendem Maße von der roten Primärvalenz $\vec{R}$ getragen.
Es sei nur noch bemerkt, daß die Hellempfindlichkeitsfunktion des Farbmetrischen Normalbeobachters ihr Maximum bei einer Wellenlänge von 555 nm hat (115).

F.9. Hellempfindlichkeitskurven

Um aus den gemessenen Spektralwertfunktionen noch Aussagen über den langwelligen Mechanismus machen zu können, führte ich nach dem in Abschnitt B.5. erläuterten Prinzip (siehe auch Tab. 9) mit Hilfe der Alychne die Reduktion auf eine Hellempfindlichkeitsfunktion $\bar{l}(\lambda)$ durch.
Nach neuerer Auffassung (8) besitzt der Deuteranop und damit auch der der Pittschen Hellempfindlichkeitskurve (gestrichelte Kurve in den Abb. 14 bis 17) als Reduktionsform des normalen Trichromaten nur ein photolabiles Pigment im mittel- und langwelligen

Bereich, nämlich Erythrolab. Dieses ist sowohl bei Deuteranopen als auch bei Deuteranomalen für die spektrale Hellempfindlichkeit maßgebend. Vom Verlauf meiner gemessenen spektralen Hellempfindlichkeitsfunktionen kann man somit auf die spektrale Absorption des langwelligen Pigments, vom Einfluß der okularen Medien abgesehen, schließen. Der eindimensionale, monochromatische Raum liefert offenbar unmittelbar eine Grundspektralwertkurve, die wir mit der spektralen Hellempfindlichkeit identifizieren können, da sie keine negativen Äste mehr zeigt.

Aus den Gleichungen der Tabelle 9 für $\bar{l}(\lambda)$ und aus den Abbildungen 14 bis 17 ist der Einfluß des langwelligen Mechanismus ganz klar ersichtlich. Die Fehlfarbenbestimmung geht direkt in diese Gleichungen ein. Somit kann man aus dem Fehlfarbenwert R_F gemäß der Gleichung $\vec{f} = 0 \cdot \vec{B} + 1 \cdot \vec{G} + R_F \cdot \vec{R}$ (Tabelle 1) den Verlauf der Hellempfindlichkeitskurve voraussagen. Judd (39) gibt ebenfalls einen Überblick über diese Beziehungen.

Die normale Hellempfindlichkeitskurve hat ihr Maximum bei 555 nm. Der Deuteranop von Pitt hat ein ähnliches Maximum bei 560 nm. Für den Fehlpunkt von Nyberg und Justowa (56) $x = 1{,}7$ und $y = -0{,}7$ liegt das Maximum bei 573 nm. Graham und Hsia (30) erreichen für ihre deuteranopische Hellempfindlichkeitskurve ein λ_{max} von 575 nm.

Hecht und Shlaer (26) berichten von einer protanopischen Hellempfindlichkeitskurve mit einem Maximum bei 536,4 nm; zwei von ihnen untersuchte Deuteranope differieren erheblich in ihren Kurven, ihre Maxima liegen bei 567,9 nm und 578,7 nm.

Sind alle diese Messungen als richtig anzusehen, so gibt es also Deuteranope mit annähernd normaler Hellempfindlichkeitskurve und solche mit starken Abweichungen. Die Verschiebung erfolgt jedoch in jedem Fall zu längeren Wellenlängen. Ein Wandern des Fehlpunktes nach links oben (sowohl in der Normfarbtafel als auch in der Wrightschen (B,G,R)-Farbtafel, Abb. 8 u. 9) ergibt Hellempfindlichkeitsfunktionen mit einer Verschiebung zu kürzeren Wellenlängen.
Dem protanopischen Fehlpunkt entsprechend, x = 0,75 und y = 0,25, führt dies folgerichtig zu einem Helligkeitsmaximum bei 540 nm. Die gerade erwähnten Werte von Hecht und Shlaer liegen genau in diesem Bereich. Ähnliche Versuche liegen von Paulus (58) vor.

Für die Helligkeitskurve eines Deuteranomalen gibt Pitt (62) einen Maximumbereich von 564 bis 568 nm an. Alpern und Torii (4) bestimmten die photopischen Hellempfindlichkeitskurven von sieben Deuteranopen und elf Deuteranomalen. Während das Maximum der mittleren Kurven bei etwa 565 bis 570 nm identisch ist, unterscheiden sich die Deuteranomalen signifikant durch höhere Empfindlichkeit im blau-grünen und verminderte Empfindlichkeit im roten Bereich, was die Autoren dem "anomalen" Pigment zuschreiben. Hurvich und Jameson (32) legen den Bereich der spektralen Helligkeitsverteilung für Deuteranomale zwischen 550 nm und 580 nm, für Protanomale geben sie einen Bereich von 520 bis 550 nm an.
Die Hellempfindlichkeitsfunktionen meiner vier untersuchten Deuteranomalen weisen stark abweichende Wellenlängenmaxima auf: H.S.: 584 nm, M.B.: 574 nm, R.H.: 586 nm, K.S.: 582 nm (siehe Abschnitt E.6. und Abbildungen 14 bis 17).

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, daß die Deuteranomalen ein langwelliges Zapfenpigment besitzen, das interpersonell in seiner Lage über der Wellenlängenachse erheblich streut. Dabei könnten die Verschiebungen Ausdruck des Einflusses von unterschiedlichem Erythrolab sein.
Für Protanomale finden Wolf und Scheibner (112) ähnliche Ergebnisse.

F.10. Fusion oder Ausfall?

Der Vorgang des Farbensehens ist nicht allein auf einen bestimmten Prozeß beschränkt. Die retinale Ebene ist mit ihren drei Rezeptoren der Sitz der absorptionsfähigen Systeme. Die Verarbeitung der einfallenden Strahlung erfolgt dabei nach dem Univarianzprinzip in drei getrennt voneinander funktionierenden photoempfindlichen Zapfenpigmenten. Dieser Vorgang, der Quanteneinfang, bei dem es nicht darauf ankommt, welche Art von Quanten aufgenommen werden, bildet das Substrat der photochemischen Reaktion. Die eigentliche Farbempfindung wird durch das Verhältnis der Erregung charakterisiert. Postrezeptoriell, auf neuronaler Ebene, finden Vorgänge statt, die eine Gegenfarbentheorie (28, 31), aber möglicherweise auch eine Fusionstheorie erklären können.
Richards und Luria (67) halten für die Deuteranopie sowohl die Ausfallhypothese als auch die Fusionshypothese für möglich. Für Deuteranomale weisen sie auf den "teilweisen Verlust" oder die "Fusion" des Deutero-Systems hin. Sie schließen daher auf zwei Arten von Deutero-Störungen. Dies ist eine Unterstützung für die

Zwei-Typen-Auffassung der Deuteranopie von Willmer, Typ I und Typ II (111).

Pitt (63) folgert aus der Parallelität der isochromatischen Linien zur rot-grünen Dreiecksseite das Vorliegen einer Fusionsdeuteranopie. Judd (37) legt unter Benutzung von Pitts Daten die grüne Primärvalenz $\vec{D}$ auf die Alychnenspur und folgert aus der dann identischen Hellempfindlichkeitskurve des normalen Trichromaten und des Deuteranopen das Vorliegen einer Fusion des roten und grünen Mechanismus.

Die Annahme von Pitt ist schon von Nyberg und Justowa auf eine fehlerhafte mathematische Interpretation zurückgeführt worden (56). Judds Hypothese kann nicht als richtig angesehen werden, da es nicht erwiesen ist, daß $\vec{D}$ auf der Alychne liegt (Abb. 8). Zudem gibt es deutliche Unterschiede zwischen der deuteranopischen und der normalen Hellempfindlichkeitskurve. Die Fusionshypothese wird deshalb von Nyberg und Justowa weitestgehend abgelehnt (56, 57).

Die densitometrischen Untersuchungen von Rushton (72, 75, 76) ergaben für Deuteranope nur ein Pigment im mittel- und langwelligen Bereich, nämlich Erythrolab, und für Protanope ebenfalls nur ein Pigment, nämlich Chlorolab. Das spricht eindeutig für die Ausfallhypothese.

Alpern und Torii (46) sowie Alpern und Pugh (9) weisen ebenfalls auf das Vorhandensein nur eines langwelligen Pigmentes bei Deuteranopen hin.

Vos und Walraven (102, 108) geben für das Verhältnis der Anzahl roter, grüner, blauer Sehzapfen 32:16:1 für Trichromaten an. Protanope und Deuteranope zeichnen sich durch das vollständige Fehlen eines

neurophysiologischen "Kanals" auf dem Niveau der Gegenfarben aus.

In einem Übersichtsbericht ordnet Wald (103) der Protanopie und der Tritanopie jeweils den Verlust des roten bzw. des blauen Pigments zu. Für die Deuteranopie gibt er zwei Arten an, einmal den Ausfall des grünen Pigments und dann die sogenannte "rot-grüne Synchromie". Eine Erregung des mittel- und langwelligen Pigments führt zur Empfindung gelb. Diese Fusion entspricht dem Typ II von Willmer. In einer späteren Arbeit (104) nimmt Wald seine Aussage zur rot-grünen Synchromie zurück. Die Fusionshypothese wird für dreizehn Deuteranope und sieben Deuteranomale abgelehnt. Er schließt daraus, daß nur die Ausfallhypothese das Wesen der dichromatischen Farbenfehlsichtigkeit richtig wiedergibt.

Während Scheibner (92) bei der Untersuchung von deuteranopischen und deuteranomalen Fehlfarben zu keiner endgültigen Klärung über das Problem Ausfall- und Fusionshypothese kommt, liefert er zusammen mit Boll (85) eine Unterstützung der Ausfallhypothese für die Deuteranopie.

Nicht zuletzt durch die Arbeiten von Rushton neigt man heute dazu, der Ausfalltheorie den Vorzug zu geben. Dennoch hat auch die Fusion nach wie vor ihre Berechtigung, wenn nicht auf Rezeptorebene, so vielleicht doch auf neuronaler Verschaltungsstufe.

F.11. Worin besteht die Alteration der Deuteranomalie gegenüber der normalen Trichromasie?

Scheibner, Kellermann und Boll (86) beweisen durch Benutzung der Quotientenregel eine Empfindlichkeitsverminderung im langwelligen

Bereich für Protanomale. Alpern und Moeller (10) haben drei Deuteranomale untersucht und sie untereinander und mit einem Normalsichtigen verglichen. Dabei zeigt sich, daß die Deuteranomalen sich erwartungsgemäß von dem Normalen deutlich unterscheiden. Der Vergleich der Deuteranomalen unter sich läßt die Autoren zu der Überzeugung gelangen, daß unterschiedliche Deuteranomale unterschiedliche Zapfenpigmente besitzen, deren spektrale Empfindlichkeit deutlich voneinander abweicht.

Der Ansatz meiner Untersuchungen war in etwa identisch mit dem von Alpern und Moeller. Allerdings kommt, wie bereits erwähnt, eine Tatsache hinzu, die eventuell ein anderes Licht auf die Ergebnisse wirft. Die beiden untersuchten Versuchspersonen H.S. und K.S. sind Brüder.

Piantanida (60) beschäftigt sich ausführlich mit der Vererbung von Farbenfehlsichtigkeiten. Pickford (61) geht auf die Deutero-Störungen innerhalb eines Familienstammbaums ein. Er schließt verschiedene Vermutungen an, z.B. über das Vorhandensein mehrerer Arten von Deuteranomalie und über die unterschiedliche Ausprägung des Deuteranopie-Gens beim Auftreten mit dem Deuteranomalen-Gen.

Nach Kalmus (40) herrscht heute vornehmlich die Zwei-Loci-Hypothese zur Erklärung der Vererbung des Farbensehens, d.h., die Vererbung des Protanopie-Protanomalie-Defekt-Allels und des Deuteranopie-Deuteranomalie-Defekt-Allels sind unabhängig. Danach müßte auch ein crossing over möglich sein. Hierzu bietet Jaeger (35) einige unterstützende Aussagen.

Die Gesetze der Vererbung, insbesondere die absteigende Dominanz, nämlich normale Trichromasie - einfache Deuteranomalie - extreme Deuteranomalie - Deuteranopie

bedeuten, daß es für die Mutter der beiden untersuchten Brüder - denn nur von ihr können sie das defekte Gen erhalten haben - in der von Walls und Mathews (105) gebrauchten Schreibweise, folgende Möglichkeiten des Genotyps gibt:

P : D / P : DA oder P : D / P : EDA

P und D stehen für die normalen Pigmente Erythrolab und Chlorolab, DA für die einfache Deuteranomalie und EDA für die extreme Deuteranomalie.

Eine Untersuchung der Mutter der beiden untersuchten Deuteranomalen H.S. und K.S. brachte folgende Ergebnisse. Die Mutter erwies sich als normalsichtig und zeigte keine Auffälligkeiten in ihren Anomaloskopabgleichen. Eine genauere Untersuchung auf eventuell doch vorhandene Minimalstörungen konnte nicht vorgenommen werden.

Beide Söhne sollten deshalb als Defekt-Allel entweder das P:D-Gen oder das P:EDA-Gen besitzen, welches dann entweder zur "einfachen" oder zur "extremen" Deuteranomalie führt, weil auf dem y-Chromosom kein ausgleichendes Allel vorliegt. Man sollte demnach, wie bei einem Vergleichspaar von Alpern und Moeller (10), keinen Signifikanzunterschied zwischen den beiden Brüdern feststellen können.

Die Ergebnisse für die beiden Deuteranomalen zeigen jedoch deutlich, daß sie sich auf dem Signifikanzniveau von 0,1% unterscheiden. Ihre Deuteranomalie ist erstens nicht durch präretinale Absorption erklärbar und zweitens deutet alles daraufhin, daß sie sich in ihren photolabilen Mechanismen im grün-rot Bereich unterscheiden. Die Frage nach einer Klassifizierung der untersuchten Deuteranomalie muß zunächst noch offen bleiben. Da nach

den oben aufgestellten Überlegungen bezüglich des Genotyps keine Unterscheidung des mittelwelligen grünen Pigments zu erwarten war, bleibt die Frage zu stellen, ob nicht der rote Mechanismus alteriert ist, ob nicht der vererbte angeblich "normale" langwellige Mechanismus die aufgetretenen Abweichungen zwischen den beiden Brüdern erklären kann.

F.12. Einfache und extreme anomale Trichromaten

Meine vier Versuchspersonen zeigen am Nagelschen Anomaloskop (52) unterschiedliche Eigenschaften, die ihrem Anomalquotienten AQ und ihrer Umstimmbarkeit entsprechend zu den Charakterisierungen Deuteranomaler (R.H.), halbextremer Deuteranomaler (H.S. und M.B.) und vollextremer Deuteranomaler (K.S.) führen (19).
Nun zeigen sich am Dreifarbenmeßgerät jedoch Unterschiede zu den Anomaloskopabgleichen, die, da sie als genauer und sicherer gelten dürfen, zu folgender Klassifizierung führen: Deuteranomaler für R.H., H.S. und K.S. können als halbextreme Deuteranomale bezeichnet werden und M.B. als ein vollextremer Deuteranomaler.

Nun läßt der Fachnormenausschuß Farbe (FNF) die allgemeine Bezeichnung "extrem" nur für diejenigen Deuteranomalen zu, die bis zur grünen Grenzgleichung verwechseln, d.h., bis zum vollen Grün oder umgekehrt ausgedrückt, bis zu einer Einstellung, die keinen roten Anteil mehr enthält. Nach dieser einschränkenden Definition wären die Versuchspersonen H.S. und K.S. nun keineswegs mehr als "extrem" zu bezeichnen, da sie nicht zur grünen Grenzgleichung, sondern zur roten Grenzgleichung hin verwechseln. Diese Ungereimtheiten und Schwierigkeiten der Benennung tragen keineswegs zur

allgemeinen Anschaulichkeit bei.
Es gibt jedoch die Möglichkeit, sich von den etwas verwirrenden Bezeichnungen nach den Kriterien des Anomaloskopabgleichs zu lösen. Betrachtet man nämlich die von mir bestimmten Spektralwertkurven der vier untersuchten Deuteranomalen, so fällt, wie aus den Abbildungen 10 bis 13 und der Tabelle 7 zu ersehen ist, eine Abweichung gegenüber dem normalen Trichromaten sowohl für die mittelwellige Grünkurve $\bar{g}(\lambda)$ als auch für die langwellige Rotkurve $\bar{r}(\lambda)$ auf. Am deutlichsten unterscheiden sich die Versuchspersonen M.B. (Abb. 11) und R.H. (Abb. 12). Während für R.H. eine Alterierung der grünen bzw. roten Kurve jeweils in unterschiedlichem Maße zu längeren Wellenlängen besteht, so fällt für die Versuchsperson M.B. neben einer Verschiebung der grünen $\bar{g}(\lambda)$-Kurve zu längeren Wellenlängen eine Verschiebung der $\bar{r}(\lambda)$-Kurve zu kürzeren Wellenlängen auf. Wie oben erwähnt, ist R.H. gemäß den von Franceschetti (21) eingeführten Begriffen (siehe auch Abschnitt B.11.a.) als "einfacher" Deuteranomaler mit geringer Umstimmbarkeit zu benennen, während M.B. als "extremer" Deuteranomaler mit erheblicher Umstimmbarkeit zu bezeichnen ist. Dies läßt die Aufstellung von zwei neuen Hypothesen als sinnvoll erscheinen, die zu einem besseren Verständnis der Klassifizierung der Deuteranomalie führen:

a) "Einfache" Deuteranomale (R.H.) besitzen zwei gegenüber dem normalen Chlorolab und Erythrolab jeweils nach längeren Wellenlängen alterierte Pigmente.

b) "Extreme" Deuteranomale (M.B.) besitzen ein gegenüber dem normalen Chlorolab nach längeren Wellenlängen alteriertes Pigment und ein gegenüber dem normalen Erythrolab nach kürzeren

Wellenlängen alteriertes Pigment.
Die "extreme" Deuteranomalie nähert sich anschaulich durch eine Verschiebung der grünen Kurve zu längeren Wellenlängen und gleichzeitig der roten Kurve zu kürzeren Wellenlängen, gleichsam durch "Verschmelzen" der beiden Kurven, der Deuteranopie.

Die Betrachtung der Spektralwertkurven der beiden Versuchspersonen H.S. und K.S. und deren Abweichungen lassen vermuten, daß es gewisse Übergänge zwischen extremer und einfacher Anomalie gibt. Das legt den Schluß nahe:

c) Zwischen "einfacher" und "extremer" Deuteranomalie gibt es keine scharfe Dichotomie.
Die beiden Brüder lassen sich als "mittlere" Deuteranomale einordnen, wobei nach dem in Abschnitt E.7. durchgeführten Testverfahren es wahrscheinlich erscheint, daß ihre interindividuellen Unterschiede mit durch eine unterschiedlich starke Alteration des langwelligen (Rot-)Mechanismus verursacht ist.

F.13. Cluster-Hypothese

Der von Alpern et al. (8, 9, 10) eingeführte Begriff des "Clusters" (Abschnitt B.11.d.) sagt, kurz gesagt, aus, daß interpersonell sowohl das mittelwellige Chlorolab als auch das langwellige Erythrolab in einer unterschiedlichen "Anhäufung", in "Büschelform", vorliegen. Eine Unterstützung für die Cluster-Hypothese liefern Bowmaker et al. (14). An Rhesusaffen finden sie für das grüne Pigment eine zweigipfelige Pigment-Verteilung

der Zapfen, 530 nm bis 536 nm und 541 nm bis 542 nm, während das rote Pigment eine eingipfelige Verteilung von 560 nm bis 570 nm zeigt. Sie vermuten eine Korrelation zum Menschen.
Diese recht weitgehenden Auffassungen stehen in deutlichem Kontrast zu der bisher vorherrschenden Meinung zur Charakterisierung der Deuteranomalie: normales Erythrolab, Cyanolab und "anomales" Deutanolab.
Kürzlich gemachte Untersuchungen von Scheibner und Paulus (93) können das Vorhandensein eines "breiten" Chlorolab-Clusters nicht bestätigen, da ihre Protanopen nur eine sehr geringe interindividuelle Streuung zeigten.
Wolf und Scheibner (112) können die Cluster-Hypothese bei der Protanomalie mit der Alteration von zwei Pigmenten, des mittel- und langwelligen, vereinbaren.
Zu den hier aufgeführten Untersuchungen passen Ergebnisse, die Rushton und Baker (73) über die rot-grüne Empfindlichkeit des Normalen anstellten. Dabei variiert das grün/rot Verhältnis, das eine Aussage über die relative Anzahl der roten und grünen Zapfen zuläßt, von 3:1 bis zu 1:3. Diese Zahlen zeigen eine Streuung, die mehr als viermal höher liegt, als für einen gewöhnlichen Anomaloskopabgleich.
Nun zurück zu meinen Ergebnissen. Sie bestätigen die Auffassung von Alpern et al. über die Cluster-Hypothese (100). Zunächst differieren die vier untersuchten Deuteranomalen in ihren Fehlpunkten derart, daß sie nach statistischer Testung nicht aus einer Population stammen können (Abschnitt F.3.). Da jedoch die Fehlfarbe und mehr noch die Hellempfindlichkeitskurve $\bar{l}(\lambda)$ maßgeblich durch das langwellige Erythrolab bestimmt werden, scheint

ein Unterschied in diesem Pigment wahrscheinlich.
Es liegt also nahe, die interindividuellen Abweichungen auf eine mögliche Alteration auch des Erythrolabs zurückzuführen, neben der erwarteten klassischen Alteration des mittelwelligen Chlorolabs. Im übrigen bieten die zuletzt beschriebenen Ergebnisse, die mit Hilfe der Quotientenbildung die Differenzen zwischen zwei der vier Deuteranomalen deutlich machten, ebenfalls einen Hinweis auf die Alteration, zumindest auf eine Uneinheitlichkeit, des Erythrolabs.
Die Einführung des Clusterbegriffs auch für die normalen Trichromaten, die ja ebenfalls erhebliche Inhomogenität zeigen (73), bietet die Möglichkeit einer Erklärung für die unterschiedlichen "anomalen" mittel- und/oder langwelligen Pigmente.
Die von Alpern und Moeller (10) aufgestellte Vermutung, daß bei der Deuteranomalie beide Pigmente im rot-grün Bereich aus dem Erythrolab-Cluster stammen, kann von mir weder bestätigt noch verworfen werden. Die Möglichkeit erscheint mir jedoch eher unwahrscheinlich.

Die Cluster-Hypothese stellt keinen Widerspruch zu meiner Hypothese der "einfachen" und "extremen" Deuteranomalie dar. Vielmehr beinhaltet ein Vorliegen der Pigmente in Cluster-Anordnung durchaus eine Streuung von der "einfachen" bis hin zur "extremen" Deuteranomalie. Allerdings bedarf es für die Bestätigung meiner Hypothesen, insbesondere für den nur einmal untersuchten Fall der "extremen" Deuteranomalie (M.B.), noch weiterer Untersuchungen mit einer größeren Population.

C. Zusammenfassung

1. Die Bestimmung der Fehlfarbe von vier Deuteranomalen brachte interindividuell differierende Ergebnisse. Gleichzeitig zeigten sich erhebliche Abweichungen von deuteranopischen Fehlfarben.

2. Die mit Hilfe der Fehlfarbe durchgeführte Reduktion des anomalen trichromatischen Farbenraums auf die Deuteranopie führt nach dem H-Test von Kruskal und Wallis zu der Auffassung, daß die vier Deuteranomalen nicht einer gemeinsamen Population entstammen.

3. Für jede Versuchsperson wurden Spektralwertkurven aufgestellt und mit denen des Farbmetrischen Normalbeobachters CIE 1931 in der von Judd modifizierten Form verglichen. Dabei bestätigte sich die "klassische" Alteration des mittelwelligen Mechanismus. Aber auch das langwellige Pigment zeigte Besonderheiten.

4. Mit Hilfe der Alychne konnte das Farbensehen auf ein reines Helligkeitssehen reduziert werden. Die Betrachtung der so gewonnenen Hellempfindlichkeitsfunktion $\bar{l}(\lambda)$, die vornehmlich durch das langwellige Erythrolab bestimmt wird, läßt an ein interpersonell über der Wellenlängenachse stark streuendes langwelliges Zapfenpigment denken.

5. Der Vergleich des grün-rot Verhältnisses der beiden Versuchspersonen H.S. und K.S. nach der Methode nach von Kries, modifiziert nach Alpern und Moeller, unterstützt die in 4. gemachte Aussage, und deutet ebenfalls auf ein alteriertes langwelliges Erythrolab hin, da nach den Gesetzen der Vererbung ein Unter-

schied zwischen den Brüdern im Deuteranopie-Deuteranomalie-Allel nicht zu erwarten ist.

6. Mit Hilfe der Abweichungen der mittel- und langwelligen Spektralwertkurven ist eine Einteilung der Deuteranomalie in eine "einfache" Form, mit einer Verschiebung beider Kurven zu längeren Wellenlängen, und in eine "extreme" Form mit einer Verschiebung der mittelwelligen Kurve zu längeren und der langwelligen Kurve zu kürzeren Wellenlängen, möglich.

7. Die von Alpern und seinen Mitarbeitern stammende Cluster-Theorie der Pigmente, die diese für Normale, Deuteranope und Deuteranomale aufgestellt haben, läßt sich auch mit den Ergebnissen der hier untersuchten Deuteranomalen vereinbaren.

H. Schrifttum

(1) ABNEY, W. de W., The colour sensation in terms of luminosity. Phil. Trans. Roy. Soc. 193 (1900)

(2) ABNEY, W. de W., Researches in colour vision and the trichromatic theory. London: Longmans, Green 1913

(3) ALPERN, M. a. S. TORII, The luminosity curve of the protanomalous fovea. J. gen. Physiol. 52, (1968), S. 717-737

(4) ALPERN, M. a. S. TORII, The luminosity curve of the deuteranomalous fovea. J. gen. Physiol. 52 (1968), S. 738-749

(5) ALPERN, M. a. S. TORII, Prereceptor colour vision distortions in protanomalous trichromacy. J. Physiol. 198 (1969), S. 549-560

(6) ALPERN, M. J. MINDEL a. S. TORII, Are there two types of deuteranopes? J. Physiol. 199 (1968), S. 443-456

(7) ALPERN, M., B. BASTIAN, E.N. PUGH jr. u. W. GRAS, Altered ocular pigments, photostabil and labile. In: Colour Vision Deficiencies III, Herausg. v. G. Verriest, Basel: Karger 1976 (= Modern Problems in Ophthalmology, Vol. 17, S. 273-291)

(8) ALPERN, M. a. T. WAKE, Cone pigments in human colour vision defects. J. Physiol. 266 (1977), S. 595-612

(9) ALPERN, M. a. E.N. PUGH jr., Variation in the spectrum of erythrolabe among deuteranopes. J. Physiol. 266 (1977), S. 613-646

(10) ALPERN, M. a. J. MOELLER, The red and green cone visual pigments of deuteranomalous trichromacy. J. Physiol. 266 (1977), S. 647-675

(11) BAKER, H.D. a. W.A.H. RUSHTON, The red-sensitive pigment in normal cones. J. Physiol. 176 (1965), S. 56-72

(12) BECK, H. u. M. RICHTER, Neukonstruktion des Dreifarben-Meßgerätes nach Guild-Bechstein. Die Farbe 7 (1958), S. 141-152

(13) BOUMA, P.J., Farbe und Farbwahrnehmung. Eindhoven: N.V. Philips Gloelampenfabrieken 1951

(14) BOWMAKER, J.K., H.J.A. DARTNALL, J.N. LYTHGOE a. J.D. MOLLON, The visual pigments of rods and cones in the rhesus monkey, macaca mulatta. J. Physiol. 274 (1978), S. 329-348

(15) COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE (CIE), C.R. 8me session, Cambridge 1931, S. 19-29

(16) COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE (CIE), Farbmessung, offizielle Empfehlungen der internationalen Beleuchtungskommission. Publication CIE No. 15 (1971), S. 71

(17) CRUZ-COKE, R., Color blindness. Springfield, Illinois: C.C. Thomas 1970

(18) DEUTSCHE NORMEN: DIN 5033, Farbmessung, Grundbegriffe der Farbmetrik (1979)

(19) FACHNORMENAUSSCHUSS FARBE (FNF): Anweisung für die Untersuchung des Farbensehens mit dem Anomaloskop nach Nagel. Die Farbe 6 (1958), S. 141-152

(20) FICK, A., Die Lehre von der Lichtempfindung. In: L. Herrmann (Herausg.) Handbuch der Physiologie, 3. Auflage, Leipzig: Vogel (1897), S. 139-234

(21) FRANCESCHETTI, A., Die Bedeutung der Einstellungsbreite am Anomaloskop für die Diagnose der einzelnen Typen der Farbensinnstörungen, nebst Bemerkungen über ihren Vererbungsmodus. Schweiz. med. Wschr. 58 (1928), S. 1273-1279

(22) GRAHAM, C.H., Color: Data and theories. In: GRAHAM, C.H. (ed.), Vision and visual perception. New York: Wiley 1965

(23) GRASSMANN, H., Zur Theorie der Farbenmischung. Poggendorffs Ann. Physik 89 (1853), S. 69-84

(24) GUILD, J., The colorimetric properties of the spectrum. Philos. Trans. Acad. 230 (1931), S. 149

(25) HAYHOE, M. a. D.I.A. MAC LEOD, A single anomalous photopigment. J. opt. Soc. Amer. 66 (1976), S. 276-277

(26) HECHT, S. a. S. SHLAER, The color vision of dichromats. J. gen. Physiol. 20 (1936), S. 57-82

(27) HELMHOLTZ, H. von, Handbuch der physiologischen Optik. (2. Aufl.), Hamburg/Leipzig: Voß 1896

(28) HERING, E., Zur Lehre vom Lichtsinn. Wien: Karl Gerolds Sohn 1878, Berlin: J. Springer 1918

(29) HESSENBERG, G., Ebene und sphärische Trigonometrie. Sammlung Göschen Band 99, 4. Auflage, Berlin: Walter de Gruyter (1948)

(30) HSIA, Y. a. C.H. GRAHAM, Spectral luminosity curves for protanopic, deuteranopic, and normal subjects. Proc. Nat. Acad. Sciences 43 (1957), S. 1011-1019

(31) HURVICH, L.M. a. D. JAMESON, Color theory and abnormal red-green vision. Docum. Ophthal. 16 (1962), S. 409-422

(32) HURVICH, L.M., Color vision deficiencies. In: Handbook of sensory Physiology VII/4, Visual Psychophysics (ed. by D. Jameson and L. M. Hurvich), (1972), S. 582-624

(33) HURVICH, L.M. a. D. JAMESON, Evaluation of single pigment shifts in anomalous color vision. In: Colour Vision Deficiencies II, herausg. v. G. Verriest, Basel: Karger 1974 (=Modern Problems in Ophthalmology, Vol. 13), S. 200-209

(34) JACOBS, G.H., Color vision. Ann. Rev. Psychol. 27 (1976), S. 63-89

(35) JAEGER, W., Genetics of congenital colour deficiencies. In: Handbook of Sensory Physiology VII/4, Visual Psychophysics, (ed. by D. Jameson a. L.M. Hurvich), (1972), S. 625-642

(36) JAMESON, D. a. L.M. HURVICH, Theoretical analysis of anomalous trichromatic color vision. J. opt. Soc. Amer. 46 (1956), S. 1075-1089

(37) JUDD, D.B., Standard response functions for protanopic and deuteranopic vision. J. opt. Soc. Amer. 35 (1945), S. 199-221

(38) JUDD, D.B., Report of U.S. Secretariat committee on colorimetry and artificial daylight. CIE Proc. 1, part 1, Stockholm: Paris Bureau Central CIE 1951, S. 11

(39) JUDD, D.B., Fundamental studies of color vision from 1860 to 1960. Proc. Nat. Acad. Science 55 (1966), S. 1313-1330

(40) KALMUS, H., Diagnosis and genetics of defective colour vision. Oxford: Pergamon Press 1965

(41) KÖNIG, A. u. C. DIETERICI, Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbensystemen und ihre Intensitätsverteilung im Spektrum. Z. Psychol. u. Physiol. Sinnesorg. 4 (1892), S. 241-347

(42) KRIES, J. von, Ueber die dichromatischen Farbensysteme (partielle Farbenblindheit). Centralbl. f. Physiol. Bd. X (1897), S. 148-152

(43) KRIES, J. von, Über Farbensysteme. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. Sinnesorg. 13 (1897), S. 247-324

(44) KRIES, J. von, Ueber die anomalen trichromatischen Farbensysteme. Z. Psychol. u. Physiol. Sinnesorg. 19 (1899), S. 63-69

(45) KRÖGER-PAULUS, A., Reduktion der Deuteranopie aus der normalen Trichromasie. Dissertation Düsseldorf (1979)

(46) KRÖGER-PAULUS, A., H. SCHEIBNER, Variation of deuteranopic blind fundamentals and the visual cone pigment erythrolab. Ophthalmic Research 12 (1980), S. 177-183

(47) LEBER, T, Ueber die Theorie der Farbenblindheit und ueber die Art und Weise, wie gewisse, der Untersuchung von Farbenblinden entnommene Einwände gegen die Young-Helmholtz'sche Theorie sich mit derselben vereinigen lassen. Klin. Mbl. Augenheilk. 11 (1873), S. 467-473

(48) MAC LEOD, D.I.A. a. M. HAYHOE, Three pigments in normal and anomalous color vision. J. opt. Soc. Amer. 64 (1974), S. 92-96

(49) MAXWELL, J.C., Experiments on colour, as perceived by the eye, with remarks on colour blindness. Trans. Roy. Soc. Edinburgh 21 (1855/57), S. 275-297

(50) MAXWELL, J.C., On the theory of compound colours of the spectrum. Phil. Trans. Roy. Soc. 150 (1860), S. 57-84

(51) MITCHELL, D.E. a. W.A.H. RUSHTON, The red/green pigments of normal vision. Vision Res. 11 (1971), S. 1045-1056

(52) NAGEL, W.A., Zwei Apparate für die augenärztliche Funktionsprüfung. Adaptometer und kleines Spektralphotometer (Anomaloskop). Z. Augenheilk. 17 (1907), S. 201-222

(53) NAGEL, W.A., Über typische und atypische Farbensinnstörungen. Z. Psychol. u. Physiol. Sinnesorg. 43 (1909), S. 299-309

(54) NELSON, J.H., Anomalous trichromatism and its relation to normal trichromatism. Proc. Physical Soc. 50 (1938), S. 661-701

(55) NIMEROFF, I., Deuteranopic convergence point. J. opt. Soc. Amer. 60 (1970), S. 966-969

(56) NUBERG, N.D. u. E.N. JUSTOVA, Untersuchungen des Farbensehens bei Dichromaten (Russ.). Trudy gos. opt. Inst. 24 (1955), Nr. 143 S. 33-93

(57) NUBERG, N.D. a. E.N. JUSTOVA, Researches on dichromatic vision and the spectral sensitivity of the receptors of trichromats. In: Nat. Physical Laboratory, Visual Probl. Colour 2 (HMSO, London 1958), S. 477-486

(58) PAULUS, W., Fehlfarben und Alychnen von Protanopen und Protanomalen und ihre Bedeutung für das Farbensehen der normalen Trichromaten. Dissertation Düsseldorf 1977, erscheint demnächst in DIE FARBE

(59) PIANTANIDA, T.P. a. H.G. SPERLING, Isolation of a third chromatic mechanism in the deuteranomalous observer. Vision Res. 13 (1973), S. 2049-2058

(60) PIANTANIDA, T.P., Polymorphism of human color vision. Amer. J. Optometry Physiol. Optics 53 (1976), S. 647-657

(61) PICKFORD, R.W., A pedigree showing variability in deuteranomaly. Vision Res. 8 (1968) S. 469-474

(62) PITT, F.H.G., Characteristics of dichromatic vision with an appendix on anomalous trichromatic vision. Priv. Counc. Med. Res. Counc., Spec. Rep. Ser. 200 (1935), London, S. 1-58

(63) PITT, F.H.G., The nature of normal trichromatic and dichromatic vision. Proc. Roy. Soc. London, Ser. B, Biological Sciences 132 (1944), S. 101-117

(64) PITT, F.H.G, Some aspects of anomalous vision. Docum. Ophthal. III (1949), S. 307-317

(65) POKORNY, J. a. V.C. SMITH, Evaluation of single-pigment shift model of anomalous trichromacy. J. opt. Soc. Amer. 67 (1977), S. 1196-1209

(66) RAYLEIGH, LORD F.R.S., Experiments on colour. Nature 25 (1881), S. 64-66

(67) RICHARDS, W. a. S.M. LURIA, Recovery and spectral sensitivity curves for color-anomalous observers. Vision Res. 8 (1968), S. 929-938

(68) RICHTER, M. u. H. TERSTIEGE, Demonstration der Entstehung der Spektralwertkurven. Die Farbe 17 (1968), S. 209-223

(69) RICHTER, M., Einführung in die Farbmetrik. Berlin: de Gruyter 1976 (Sammlung Göschen 2608)

(70) RÖNNE, H., Ueber Uebergangsformen zwischen anomaler Trichromasie und dichromatischem Farbensystem. Monatsbl. f. Augenheilk. 86 (1928), S. 47-49

(71) RUDDOCK, K.H., Light transmission through the ocular media and macular pigment and its significance for psychophysical investigations. In: Handbook of Sensory Physiology VII/4, Visual Psychophysics, (ed. by D. Jameson and L.M. Hurvich),(1972), S. 455-469

(72) RUSHTON, W.A.H., A cone pigment in the protanope. J. Physiol. 168 (1963), S. 345-359

(73) RUSHTON, W.A.H. a. H.D. BAKER, Red/green sensitivity in normal vision. Vision Res. 4 (1964), S. 75-85

(74) RUSHTON, W.A.H., Colour blindness and cone pigments. Amer. J. Optometry and Arch. Acad. Optometry 41 (1964), S. 265-282

(75) RUSHTON, W.A.H., A foveal pigment in the deuteranope. J. Physiol. 176 (1965), S. 24-37

(76) RUSHTON, W.A.H., D. SPITZER POWELL a. K.D. WHITE, The spectral sensitivity of "red" and "green" cones in the normal eye. Vision Res. 13 (1973), S. 2003-2015

(77) RUSHTON, W.A.H., D. SPITZER POWELL a. K.D. WHITE, Pigments in anomalous trichromats. Vision Res. 13 (1973), S. 2017-2033

(78) SACHS, L., Statistische Auswertungsmethoden. Dritte Auflage, Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag 1971, S. 238-240

(79) SCHEIBNER, H., Über Farben und ihre Metrik. Lichttechnik 16 (1964), S. 497-498

(80) SCHEIBNER, H., On colours of the same appearence. Opt. Acta 13 (1966), S. 205-210

(81) SCHEIBNER, H., Trichromasie, Dichromasie, Monochromasie. Opt. Acta 15 (1968), S. 329-338

(82) SCHEIBNER, H., Dichromasie als Homomorphismus der Trichromasie. Opt. Acta 15 (1968), S. 339-349

(83) SCHEIBNER, H., Über die Begriffe Farbvalenz, Farbart und Chrominanz in der Farbmetrik. Die Farbe 18 (1969), S. 221-232

(84) SCHEIBNER, H., Chrominanz und Farbart (Chromatizität) beim Farbensehen. Opt. Acta 17 (1970), S. 143-150

(85) SCHEIBNER, H. u. M.BOLL, Untersuchungen zur Deuteranopie und Deuteranomalie. Albrecht v. Graefes Arch. klin. exp. Ophthal. 185 (1972), S. 145-160

(86) SCHEIBNER, H., F.J. KELLERMANN u. M. BOLL, Untersuchungen zur Protanopie und Protanomalie. Ber. Dtsch. Ophthalm. Gesellsch. Heidelberg 1971, S. 522-530

(87) SCHEIBNER, H., Untersuchungen zur Deuteranomalie. Ber. Dtsch. Ophthalm. Gesellsch. Heidelberg 1972, S. 290-295

(88) SCHEIBNER, H. u. M. BOLL, Untersuchungen zur Protanomalie: Farbart. Opt. Acta 21 (1974), S. 365-374

(89) SCHEIBNER, H., Untersuchungen zur Protanomalie: Chrominanz und Leuchtdichte. Opt. Acta 21 (1974), S. 375-385

(90) SCHEIBNER, H., Eine verbandstheoretische Klassifikation der Protanomalie und Deuteranomalie. Opt. Acta 21 (1974), S. 489-496

(91) SCHEIBNER, H., Prüfung von Farbsinnstörungen. Med. Klin. 71 (1976), S. 1452-1459

(92) SCHEIBNER, H., Missing colours (Fehlfarben) of deuteranopes and extreme deuteranomalous observers. In: Colour Vision Deficiencies III, herausg. v. G. Verriest, Basel: Karger 1976 (=Modern Problems in Ophthalmology, Vol. 17), S. 21-26

(93) SCHEIBNER, H. a. W. PAULUS, An analysis of protanopic colour vision. In: Colour Vision Deficiencies IV, herausg. v. G. Verriest, Basel: Karger 1978 (=Modern Problems in Ophthalmology, Vol. 19), S. 206-211

(94) SCHEIBNER, H. u. O. LUDWIG, Bestimmung der Fehlfarben von Deuteranopen und extremen Deuteranomalen, Die Farbe (im Druck)

(95) SCHEIBNER, H. u. N. BOLL, Bestimmung der Alychne von Deuteranopen und extremen Deuteranomalen. Die Farbe (im Druck)

(96) SCHEIBNER, H., O. LUDWIG u. C. HÜBNER, Deuteranopie und extreme Deuteranomalie. Die Farbe (im Druck)

(97) SMITH, V.C. a. J. POKORNY, Spectral sensitivity of color-blind observers and the cone photopigments. Vision Res. 12 (1972), S. 2059-2071

(98) SMITH, V.C. a. J. POKORNY, Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm. Vision Res. 15 (1975), S. 161-171

(99) SPERLING, H.G. a. T.P. PIANTANIDA, Isolation of the third chromatic mechanism in simple anomalous trichromacy. In: Colour Vision Deficiencies II, herausg. v. G. Verriest, Basel: Karger 1974 (= Modern Problems in Ophthalmology, Vol. 13), S. 145-164

(100) STÖCKER, H., E. WOLF u. H. SCHEIBNER, Erythrolab und Deuteranomalie, Ber. Dtsch. Ophthalmol. Ges. 76 (1979), S. 409-414

(101) TERSTIEGE, H., Untersuchungen zum Persistenz- und Koeffizientensatz, Die Farbe 16 (1967), S. 1-120

(102) VOS, J.J. u. P.L. WALRAVEN, On the derivation of the foveal receptor primaries. Vision Res. 11 (1971), S. 799-818

(103) WALD, G., The receptors of human color vision, Science 145 (1964), S. 1007-1017

(104) WALD, G., Gibt es zwei verschiedene Typen von Deuteranopie? Ber. Dtsch. Ophthalm. Gesellsch. 67 (1966), S. 272-273

(105) WALLS, G.L. a. R.W. MATHEWS, New means of studying color blindness and normal foveal color vision. Berkeley: University of California Press, 1952

(106) WALRAVEN, P.L., A.M.J. VAN HOUT, a. H.J. LEEBECK, Fundamental response curves of a normal and a deuteranomalous observer derived from chromatic adaptation data, J. opt. Soc. Amer. 56 (1966), S. 125-127

(107) WALRAVEN, P.L., Color vision. Ann. Review Psychol. 23 (1972), S. 347-374

(108) WALRAVEN, P.L., Basic Mechanisms of defective colour vision. In: Colour Vision Deficiencies III, Herausg. v. G. Verriest, Basel: Karger 1976 (=Modern Problems in Ophthalmology, Vol. 17), S. 2-16

(109) WATKINS, R.D., Foveal increment thresholds in normal and deutan observers. Vision Res. 9 (1969), S. 1185-1196

(110) WATSON, W., On anomalous trichromatic colour vision. Proc. Roy. Soc. London A 90 (1914), S. 443-448

(111) WILLMER, E.N., Further observations on the properties of the central foveal in colour-blind and normal subjects. J. Physiol. 110 (1950), S. 422-446

(112) WOLF, E. a. H.SCHEIBNER, One versus two altered cone pigments in protanomalous volour vision. Pflügers Archiv 373 (1978), Supplement R 73

(113) WOLF, E. a. H. SCHEIBNER, Fundamental primaries of anomalous trichromats. Pflügers Archiv 384 (1980), Supplement R 24

(114) WRIGHT, W., A re-determination of the trichromatic mixture data. Spec. med. Res. Counc. 139 (1929), S. 1-38

(115) WRIGHT, W.D., Researches on normal and defective colour vision, London: Kimpton 1946

(116) WYSZECKI, G., Valenzmetrische Untersuchung des Zusammenhanges zwischen normaler und anomaler Trichromasie, Die Farbe 2 (1953), S. 39-52

(117) WYSZECKI, G. a. W.S. STILES, Color science. New York: Wiley 1967

(118) YOUNG, T., On the theory of light and colours. Phil. Trans. Roy. Soc. (1802), In: Lectures in Nat. Phil. Vol. 2, S. 613-632, London: printed for Joseph Johnson, St. Paul's Church by William Savage 1807

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. H. Scheibner
(II. Physiologisches Institut: Direktor Prof. Dr. Haase)
für die Überlassung der Arbeit, für sein nimmermüdes Interesse
und seine wervollen Anregungen.
Herrn Dipl. Phys. E. Wolf danke ich für die Anleitung am
Dreifarbenmeßgerät und insbesondere für manche interessante
Diskussion.
Dem gesamten Institut möchte ich herzlich danksagen für die
freundliche und hilfsbereite Aufnahme und für die Bereitstellung
der recht umfangreichen Materialien.

L E B E N S L A U F

24. 12. 1954	: Geboren als drittes Kind von Heinrich Stöcker und seiner Ehefrau Christel Stöcker, geb. Wenn.
1961 - 1965	: Besuch der St. Cäcilia Volksschule in Düsseldorf-Benrath.
1965 - 1973	: Besuch des Städtischen Schloß-Gymnasiums in Düsseldorf-Benrath.
ab WS 1973/74	: Studium der Medizin an der Universität Düsseldorf.
März 1976	: Physikum (ärztliche Vorprüfung)
März 1977	: Erster Teil des Staatsexamens
März 1979	: Zweiter Teil des Staatsexamens
April 1980	: Dritter Teil des Staatsexamens
ab SS 1977	: Dissertation am II. Physiologischen Institut der Universität Düsseldorf unter der Betreuung von Prof. Dr. H. Scheibner.

Düsseldorf, den 24. März 1980